



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**PERANCANGAN *SLIDING MODE CONTROLLER* UNTUK
SISTEM PENGATURAN *LEVEL AND FLOW* DENGAN
METODE *DECOUPLING* PADA *PLANT COUPLED TANKS***

Boby Dwi Apriyadi
NRP 2212 100 120

Dosen Pembimbing
Ir. Rusdhianto Effendie AK., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGNING SLIDING MODE CONTROLLER TO CONTROL
LEVEL AND FLOW WITH DECOUPLING SYSTEM IN
PLANT COUPLED TANKS**

Boby Dwi Apriyadi
NRP 2212 100 120

Supervisor
Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh November Institute of Technology
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Perancangan *Sliding Mode Controller* Untuk Sistem Pengaturan *Level And Flow* Dengan Metode *Decoupling* Pada *Plant Coupled Tanks***” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2017

Boby Dwi Apriyadi
NRP 2212100120

**PERANCANGAN *SLIDING MODE CONTROLLER* UNTUK
SISTEM PENGATURAN *LEVEL AND FLOW* DENGAN
METODE *DECOUPLING* PADA *PLANT COUPLED TANKS***

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

**Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing



Ir. Rusdhianto Effendie A.K., MT.

NIP. 1966 06 06 1991 021 001



Perancangan *Sliding Mode Controller* untuk Sistem Pengaturan *Level and Flow* dengan Metode *Decoupling* pada *Plant Coupled Tanks*

Boby Dwi Apriyadi
2212 100 120

Dosen Pembimbing : Ir. Rusdhianto Effendie A.K., MT.
NIP : 195704241985021001

ABSTRAK

Pada industri proses yang melibatkan fluida, suatu fluida akan dipompa dan dialirkan dari satu tangki ke tangki yang lain untuk diolah. Pemindahan cairan dari satu tangki ke tangki yang lain menyebabkan berubahnya *level* fluida dalam tangki. Dalam pengaturan *level*, pemindahan cairan biasa disebut sebagai pembebanan pada *level*. Perubahan beban ini dapat mempengaruhi dari kinerja kontroler.. Kontroler yang banyak digunakan di industri proses adalah kontroler PID karena kesederhanaan struktur dan keandalannya. *Sliding Mode Controller* adalah suatu metodologi pengaturan yang mampu mengatasi perubahan yang mengganggu pada sistem, tanpa menyebabkan gangguan pada performa sistem itu sendiri. Struktur *Sliding Mode Control* terdiri dari bagian utama yang berfungsi memperbaiki sinyal *error* dengan mengarahkan sinyal tersebut pada sebuah lintasan yang diinginkan dan bagian tambahan yang berfungsi untuk mempertahankan sinyal, sehingga dapat mengatasi perubahan parameter pada *plant* dan menjaga performa dari *plant*. Berdasarkan hasil simulasi, sistem pengaturan *level* air pada *plant coupled tank* dengan *Sliding Mode Controller* mempunyai nilai *error steady state* 0,008 dan 0,0066 untuk model linier dan 0,02 dan 0,012 untuk model non-linier.

Kata Kunci : *Coupled tanks, Decoupling, Sliding Mode Controller*

DESIGNING SLIDING MODE CONTROLLER TO CONTROL LEVEL AND FLOW WITH DECOUPLING SYSTEM IN PLANT COUPLED TANKS

Boby Dwi Apriyadi
2212 100 120

Supervisor : Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.
ID : 195704241985021001

ABSTRACT

In industrial processes involving fluid, a fluid to be pumped and drained from one tank to another for processing. The transfer of liquid from one tank to another causes a change in the fluid level in the tank. In setting the level, fluid removal commonly referred to as the loading level. These load changes can affect the performance of the controller. The controllers are widely used in industrial processes is a PID controller structure for its simplicity and reliability. Sliding Mode Controller is a setting methodology capable of overcoming the disruptive change to the system, without causing interference with the performance of the system itself. Structure Sliding Mode Control consists of a main section which serves to improve the error signal with a signal directing it to a desired trajectory and an additional section that serves to maintain the signal, so that it can cope with changes in the parameters of the plant and maintain the performance of the plant. Based on simulation results, the water level control system at the plant coupled tank with Sliding Mode Controller has a value of error steady state 0.008 and 0.0066 for linear and 0.02 and 0.012 for non-linear.

Key Word : Coupled tanks, Decoupling, Sliding Mode Controller

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan anugerah-Nya.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan S-1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya .

Penulis menyadari bahwa dalam penyelesaian pengerjaan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu dengan segala hormat, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berperan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini,

Penulis memohon maaf atas segala kekurangan pada Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pengembangan keilmuan di kemudian hari.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
TABLE OF CONTENT	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Metodologi.....	3
1.6. Sistematika Penulisan	4
1.7. Relevansi.....	4
BAB II TEORI DASAR.....	5
2.1. Sistem Pengaturan.....	5
2.1.1. <i>Single Loop</i>	6
2.1.2. <i>Cascade</i>	7
2.2. <i>Coupled Tanks</i>	9
2.3. Pemodelan Sistem Pengaturan <i>Level Plant Coupled Tanks</i> ...	10
2.4. Pemodelan Sistem.....	12
2.5. <i>Decoupling</i>	14
2.6. MATLAB	17
2.7. <i>Sliding Mode Control</i>	18
2.7.1. Representasi Sistem dalam <i>State-Space</i>	18
2.7.2. <i>Sliding Surface</i>	20
2.7.3. Formulasi Sinyal Kontrol.....	21
BAB III PERANCANGAN SISTEM.....	25
3.1. Gambaran Umum Sistem.....	25
3.2. Pemodelan <i>Coupled Tank</i>	25
3.3. <i>Transfer Function Coupled Tank</i>	30

3.4. Desain <i>Decoupling</i>	31
3.5. Fungsi Alih Keseluruhan	34
3.6. Analisa Reduksi <i>Bode</i>	34
3.6.1. Reduksi <i>Bode</i> Tangki 1	34
3.6.2. Reduksi <i>Bode</i> Tangki 2	31
3.7. Perancangan Kontroler <i>Sliding Mode</i>	40
BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA	45
4.1. Simulasi Tanpa Kontroler	45
4.1.1. Simulasi Model <i>Non-Linear</i> dan Model <i>Linear</i>	45
4.1.2. Respon <i>Open Loop Linear</i> Tanpa <i>Decoupling</i>	46
4.1.3. Respon <i>Open Loop</i> Proses <i>Level</i> Dengan <i>Decoupling</i>	50
4.2. Pengujian Simulasi Menggunakan Kontroler	52
4.2.1. Blok Diagram <i>Simulink</i>	53
4.2.2. Hasil dan Analisa Simulasi <i>Plant Non-Linear</i>	54
4.2.3. Hasil dan Analisa Simulasi pada <i>Plant Linear</i>	56
BAB V PENUTUP	61
5.1. Kesimpulan	61
5.2. Saran	61
DAFTAR PUSTAKA	63
RIWAYAT PENULIS	65

TABLE OF CONTENT

COVER	
AUTHENTICITY	
APPROVAL SHEET	
ABSTRACT	i
ABSTRACT	iii
PREFACE	v
TABLE OF CONTENT	vii
TABLE OF CONTENT	ix
ILLUSTRATION	xi
TABLE LIST	xiii
CHAPTER I INTRODUCTION	1
1.1. Background	1
1.2. Problem Formulation	2
1.3. Problem Constraint	2
1.4. Research Objective	3
1.5. Methodology	3
1.6. Writing Systematic	4
1.7. Relevance	4
CHAPTER II LITERATURE OBSERVATION	5
2.1. Control System	5
2.1.1. Single Loop	6
2.1.2. Cascade	7
2.2. Coupled Tanks	9
2.3. Model Validation Level Control of Plant Coupled Tanks ..	10
2.4. System Identification	12
2.5. Decoupling	14
2.6. MATLAB	17
2.7. Sliding Mode Control	18
2.7.1. System Representation in State-Space	18
2.7.2. Sliding Surface	20
2.7.3. Control Signal Formulation	21
CHAPTER III SYSTEM DESIGN	25
3.1. General System Illustration	25
3.2. Model of Coupled Tank	25
3.3. Transfer Function Coupled Tank	30
3.4. Decoupling Design	31

3.5. Totality Transfer Function	34
3.6. Reduction Analysis.....	34
3.6.1. Reduction Tank 1	34
3.6.2. Reduction Tank 2	31
3.7. Sliding Mode Controller Design.....	40
CHAPTER IV SIMULATION AND ANALYSIS.....	45
4.1. Simulation Without Controller	45
4.1.1. Simulation Non-Linear Model and Linear Model	45
4.1.2. Linear Open Loop Response without Decoupling.....	46
4.1.3. Open Loop Response of Level Process with Decoupling	50
4.2. Simulation with Controller	52
4.2.1. Diagram Block Simulink.....	53
4.2.2. Result and Analysis Simulation Non-Linear Plant.....	54
4.2.3. Result and Analysis Simulation on Linear Plant	56
CHAPTER V CLOSING	61
5.1. Conclusion.....	61
5.2. Suggestion	61
BIBLIOGRAPHY.....	63
BIOGRAPHY.....	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram Blok Sistem Pengaturan.....	5
Gambar 2.2	Sistem Pengaturan <i>Level Single Loop</i>	6
Gambar 2.3	Diagram Blok Sistem Pengaturan <i>Level Single Loop</i> ..	7
Gambar 2.4	Diagram Blok Sistem Pengaturan Konfigurasi <i>Cascade</i>	7
Gambar 2.5	Sistem Pengaturan <i>Level</i> Konfigurasi <i>Cascade</i>	8
Gambar 2.6	Model <i>Plant Coupled Tanks</i>	9
Gambar 2.7	Diagram Blok Pemodelan Sistem Pengaturan <i>Level</i> ...	10
Gambar 2.8	Sistem MIMO pada <i>Coupled Tank</i>	14
Gambar 2.9	Sistem Dekoupling pada <i>Coupled Tanks</i>	15
Gambar 2.10	Diagram Fasa Trajektori Status	18
Gambar 3.1	Diagram Blok Sistem Pengaturan <i>Level Plant Coupled</i> <i>Tanks</i>	25
Gambar 3.2	Respon <i>Non-Linear</i> G_{11}	27
Gambar 3.3	Respon <i>Non-Linear</i> G_{12}	28
Gambar 3.4	Respon <i>Non-Linear</i> G_{22}	29
Gambar 3.5	Respon <i>Non-Linear</i> G_{21}	30
Gambar 3.6	Hasil Pemodelan Linier dengan Pendekatan Respon <i>Steady State</i>	31
Gambar 3.7	Fungsi Alih <i>Decoupling</i>	32
Gambar 3.8	Hasil Respon Menggunakan <i>Decoupling</i> pada H_1	33
Gambar 3.9	Hasil Respon Menggunakan <i>Decoupling</i> pada H_2	33
Gambar 3.10	Respon <i>Step</i> Fungsi Alih Tangki 1	35
Gambar 3.11	Respon <i>Step</i> Fungsi Alih Reduksi Tangki 1	36
Gambar 3.12	Diagram <i>Bode</i> dari Fungsi Alih Tangki 1	37
Gambar 3.13	Respon <i>Step</i> Fungsi Alih Tangki 2	38
Gambar 3.14	Respon <i>Step</i> Fungsi Alih Reduksi Tangki 2	39
Gambar 3.15	Diagram <i>Bode</i> dari Fungsi Alih Tangki 2	40
Gambar 4.1	Respon Model <i>Non-Linear</i> dan Model <i>Linear</i> Tangki 1	45
Gambar 4.2	Respon Model <i>Non-Linear</i> dan Model <i>Linear</i> Tangki 2	46
Gambar 4.3	Diagram Simulasi <i>Simulink</i> Sistem <i>Open Loop</i> Tanpa <i>Decoupling</i>	47
Gambar 4.4	Respon Sistem <i>Open Loop</i> Tanpa <i>Decoupling</i> Tangki 1	48

Gambar 4.5	Respon Sistem <i>Open Loop</i> Tanpa <i>Decoupling</i> Tangki 2	49
Gambar 4.6	Respon Sistem <i>Open Loop</i> Tanpa <i>Decoupling</i> Tangki 1 dan 2	50
Gambar 4.7	Diagram Simulasi <i>Simulink</i> Sistem <i>Open Loop</i> dengan <i>Decoupling</i>	51
Gambar 4.8	Respon Sistem <i>Open Loop</i> dengan <i>Decoupling</i> Tangki 1	51
Gambar 4.9	Respon Sistem <i>Open Loop</i> dengan <i>Decoupling</i> Tangki 2	52
Gambar 4.10	Simulasi Kontroler SMC	53
Gambar 4.11	<i>Subsystem</i> Sinyal Kontrol Ekvivalen	54
Gambar 4.12	<i>Subsystem</i> Sinyal Kontrol Natural	54
Gambar 4.13	Respon pada Tangki 1 <i>Non-Linear</i> dengan Kontroler	55
Gambar 4.14	Respon pada Tangki 2 <i>Non-Linear</i> dengan Kontroler ..	55
Gambar 4.15	Respon pada Tangki 1 <i>Linear</i> dengan Kontroler	56
Gambar 4.16	Respon pada Tangki 2 <i>Linear</i> dengan Kontroler	57
Gambar 4.17	<i>Sliding Surface</i> dari Respon Tangki 1	58
Gambar 4.18	<i>Sliding Surface</i> dari Respon Tangki 2	59

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Parameter Pemodelan <i>Plant</i>	11
Tabel 3.1	Nilai Parameter Pemodelan <i>Plant</i>	26

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

Tugas Akhir merupakan penelitian yang dilakukan oleh mahasiswa atau mahasiswi tingkat S1 Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat wajib untuk menyelesaikan studi dalam program Sarjana Teknik.

Pada BAB ini, akan dibahas mengenai hal-hal yang mendahului pelaksanaan Tugas Akhir. Hal-hal tersebut meliputi latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah, sistematika penulisan, dan relevansi.

1.1. Latar Belakang

Sistem pengendalian di industri merupakan faktor yang sangat penting dalam proses produksi. Agar produksi tetap tercapai, maka suatu sistem pengendalian sangat diperlukan untuk menjaga kestabilan variabel proses. Variabel proses antara lain *flow*, *level*, konsentrasi, *volume*, dan lain sebagainya.

Coupled tanks merupakan salah satu bagian di industri yang memiliki fungsi yang sangat vital. Secara umum *coupled tanks* terdiri dari beberapa sistem, diantaranya adalah sistem umpan air, sistem *flow*, *level* yang terintegrasi menjadi satu kesatuan. Sistem umpan air berfungsi sebagai penyedia air untuk *coupled tanks* yang bekerja secara otomatis sesuai kebutuhan *steam* dan kemampuan dari *coupled tanks* itu sendiri. Sedangkan sistem *steam* berfungsi sebagai penyedia uap air untuk proses pada *plant* yang lain. Kedua sistem ini memerlukan suatu pengaturan agar kondisi *flow* dan *level* air dapat untuk memenuhi kebutuhan proses selanjutnya. Pengaturan air dilakukan dengan mengendalikan *level* air yang terdapat di dalam *coupled tanks* itu sendiri, sedangkan *level* air dilakukan dengan mengendalikan *flow* yang masuk ke dalam *coupled tanks* sendiri. *Flow* yang dihasilkan oleh *coupled tanks* dipengaruhi oleh kondisi dari *level* air tangki terdapat di dalam *coupled tanks*.

Pemodelan *coupled tanks* termasuk kategori sistem nonlinear yang memiliki banyak ketidakpastian. Ketidakpastian tersebut dapat berupa gangguan eksternal, ketidakpastian model, variasi parameter, ataupun *error* yang muncul pada saat linierisasi. Ketidakpastian-ketidakpastian ini dapat mempengaruhi kestabilan sistem jika tidak diantisipasi oleh sistem kontrol. Selain itu, pemodelan *coupled tanks* menggunakan konfigurasi

sistem *Multi Input Multi Output*. Sehingga variabel yang diatur pada *coupled tanks* mengalami kesulitan mengikuti sinyal referensi berupa beberapa kali kondisi titik operasi yang diinginkan.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut dibuatkan model sistem kontrol menggunakan *decoupling* untuk mengatur konfigurasi *plant coupled tanks* dan *sliding mode controller* untuk mengatur *level* dan *flow coupled tanks*.

Proportional-integral-derivative (PID) banyak digunakan dalam aplikasi kontrol karena sifatnya yang *simple* dan efektif. Meskipun penggunaan kontrol PID mempunyai sejarah yang lama, tiga parameter *gain*, proporsional *gain* (K_p), integral *gain* (K_i), dan derivatif *gain* (K_d), biasanya bernilai tetap. Kelemahan kontroler PID adalah kapabilitasnya rendah dalam menghadapi ketidakpastian sistem, variasi parameter, dan gangguan dari luar. Sehingga *robustness* mendapatkan perhatian lebih.

Sliding mode control (SMC) merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengatasi ketidakpastian sistem kontrol. Keunggulan utama dari SMC adalah tingkat *robustness* dalam menghadapi variasi parameter dan gangguan luar. Berbagai aplikasi SMC telah dilakukan, seperti dalam manipulator robot, *aircrafts*, motor DC, dan lain-lain.

1.2. Perumusan Masalah

Pemodelan *Plant Coupled Tank* menggunakan sistem *Multi Input Multi Output* (MIMO). Sehingga variabel yang diatur pada tangki mengalami kesulitan mengikuti sinyal referensi berupa kondisi titik yang diinginkan. Untuk mengatasi masalah tersebut, dirancang metode *decoupling* untuk mengatasi konfigurasi *plant* MIMO serta kontroler *sliding mode* untuk mengatur *level* pada *Plant Coupled Tank*. Perubahan parameter *plant* akan menyebabkan performa *Sliding Mode Controller* tidak sesuai dengan kondisi parameter mula-mula. Untuk memenuhi spesifikasi kontroler yang diinginkan pada setiap nilai parameter *plant*, maka parameter kontroler *Sliding Mode Controller* harus ditentukan agar dapat mengatasi masalah pada *plant*.

1.3. Batasan Masalah

Plant coupled tank merupakan *plant* dengan dua tangki atau lebih yang bisa digolongkan pada *plant* MIMO, SISO atau SIMO. Pada tugas akhir ini yang akan dibahas adalah mengenai pengaturan *level* dengan sistem MIMO. Implementasi kontroler pada simulator *plant* yang dibuat pada MATLAB, belum hingga ke implementasi pada *plant real*.

Pengendalian *level* air diterapkan pada tangki satu dan tangki dua dari *plant coupled tanks*.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan Tugas Akhir ini adalah merancang kontroler dengan metode *sliding mode control* untuk pengaturan *level* dan *flow* pada *plant coupled tank*, dan mensimulasikan kontroler tersebut pada *coupled tanks* dengan MATLAB/ Simulink.

1.5. Metodologi

Dalam melaksanakan penelitian ini, dilakukan melalui beberapa tahapan yang dilalui, diantaranya:

- a. Studi Literatur
Studi literature ini dilakukan untuk mengenal topic penelitian dengan baik. Studi literatur ini meliputi mencari dan mempelajari literatur, buku-buku, dan *paper* yang relevan dengan penelitian ini mengenai materi pengaturan pada *plant coupled tank*, sistem pengaturan *decoupling*, dan *sliding mode controller*.
- b. Pemodelan *Plant*
Pada penelitian ini *plant* yang digunakan adalah simulator *plant coupled tank* yang dibangun pada perangkat lunak MATLAB, sehingga dibutuhkan model untuk dapat memberikan gambaran dari *real system*. Pemodelan *plant* ini dilakukan dengan menurunkan persamaan matematis dari *plant coupled tanks*.
- c. Perancangan Kontroler
Berdasarkan model *plant* yang telah didapat, kemudian model tersebut diuji tanpa kontroler. Dari permasalahan yang muncul dari hasil pengujian tanpa kontroler tersebut maka akan dirancang kontroler sesuai dengan spesifikasi respon yang diinginkan. Metode kontroler yang akan digunakan adalah *sliding mode controller* dengan merepresentasikan sinyal kontrol ekivalen dan sinyal kontrol natural.
- d. Simulasi
Hasil pemodelan sistem dan perancangan kontroler disimulasikan terlebih dahulu sebelum diimplementasikan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak simulasi.

e. Penulisan Buku Tugas Akhir

Penulisan buku Tugas Akhir ini dilakukan sebagai dokumentasi dari hasil penelitian yang dilakukan. Penulisan buku ini berupa laporan ilmiah yang mencakup semua proses pengerjaan penelitian ini.

1.6. Sistematika Penulisan

Secara keseluruhan, sistematika penulisan Tugas Akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan sistematika sebagai berikut:

BAB 1 : PENDAHULUAN

Bab ini meliputi latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, sistematika laporan, dan relevansi penulisan Tugas Akhir.

BAB 2 : TEORI DASAR *PLANT COUPLED TANKS*

Teori dasar yang digunakan sebagai pendukung dalam penelitian ini akan dibahas pada Bab 2 ini diantaranya *plant coupled tanks*, *sliding mode controller*.

BAB 3 : PERANCANGAN SISTEM

Tahapan-tahapan dalam perancangan sistem yang meliputi desain dan perancangan kontroler *sliding mode* berdasarkan teori pada BAB 2.

BAB 4 : HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA

Pelaporan data hasil simulasi disertai dengan analisis mengenai hasil yang didapatkan dari pengujian sistem yang dilakukan.

BAB 5 : KESIMPULAN DAN SARAN

Penulisan kesimpulan berdasarkan data yang telah diambil dan dianalisa. Selain itu juga disertakan saran mengenai kekurangan dari penelitian ini dan rencana riset selanjutnya yang bisa dikembangkan.

1.7. Relevansi

Manfaat yang didapat dari penelitian ini nantinya diharapkan kotroler *sliding mode* mampu diterapkan pada *plant coupled tanks* atau pengaturan proses lainnya dan mampu mengatasi permasalahan khususnya perubahan beban pada *plant*.

BAB II

TEORI DASAR

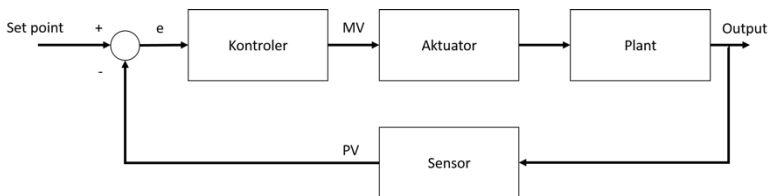
Kegiatan penelitian dan perancangan merupakan hasil mengkaji teori-teori yang sudah ada sebelumnya. Seluruh teori yang digunakan kemudian disajikan untuk memperkuat argumen penulis dalam penelitian yang dilakukan ini.

Pada BAB ini, berisi tentang bahasan teori penunjang dari berbagai *literature* atau pustaka seperti buku dan *paper* yang mendukung penelitian ini. Teori penunjang pada Bab ini meliputi tentang *plant coupled tank*, *MATLAB*, *Sliding Mode Controller*, dan analisis *Bode*.

2.1. Sistem Pengaturan [1]

Sistem merupakan sekumpulan perangkat yang saling bekerja sama untuk mencapai suatu tujuan tertentu. Pengaturan adalah sebuah metode untuk membuat nilai suatu variabel mencapai nilai tertentu yang kita inginkan. Sebagai contoh adalah menjaga ketinggian *level* air pada tangki pada ketinggian 70 cm. Secara umum, maka sistem pengaturan adalah sekumpulan perangkat atau elemen yang saling bekerja sama untuk mencapai objektif pengaturan atau kontrol sesuai dengan yang kita inginkan.

Sistem pengaturan terdiri dari beberapa elemen yang dapat dijelaskan lebih detail menggunakan diagram blok seperti pada Gambar (2.1).



Gambar 2.1. Diagram Blok Sistem Pengaturan

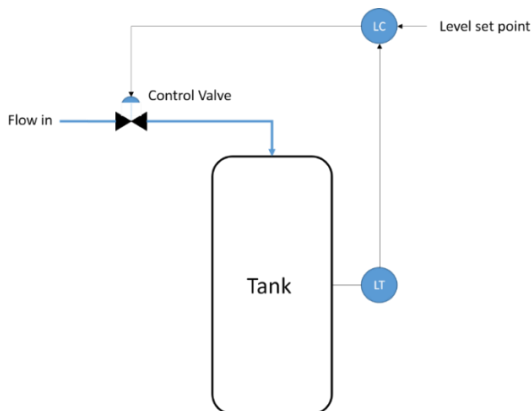
Elemen utama pada sistem pengaturan sesuai dengan diagram blok yang ditunjukkan pada Gambar (2.1) adalah *plant*, kontroler, aktuator, dan sensor. *Plant* merupakan elemen yang dikendalikan nilai keluarannya. Kontroler adalah elemen yang bertugas mengendalikan keluaran dari *plant* dan memperbaiki performa dari suatu sistem

pengeturan. Aktuator atau yang biasa disebut dengan *final control element* adalah perangkat yang berhubungan langsung dengan *plant*. Sensor sendiri adalah elemen yang berfungsi untuk membaca nilai keluaran dari *plant*.

Pada sistem pengaturan ada tiga parameter nilai, yaitu *set point* atau *set value*, *manipulated value*, dan *process value*. *Set point* merupakan nilai dari keluaran keluaran proses atau *plant* yang kita inginkan. *Manipulated value* atau biasa yang disebut dengan sinyal kontrol merupakan keluaran dari kontroler, sedangkan *process value* merupakan hasil dari pembacaan dari sensor terhadap nilai keluaran dari sebuah *plant*.

2.1.1. Single Loop [1]

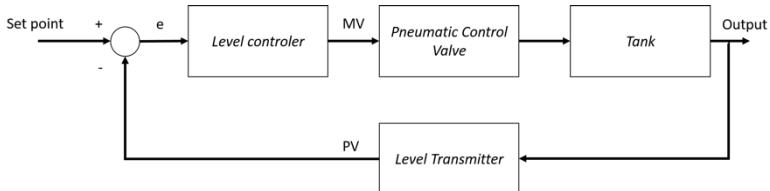
Konfigurasi *single loop* merupakan konfigurasi sistem kendali paling sederhana dimana hanya terdapat satu buah *loop* dengan satu kontroler untuk memenuhi objektif control. Diagram blok dari sistem pengaturan dengan konfigurasi *single loop* ini sama seperti pada Gambar (2.1). Sedangkan contoh implementasi dari konfigurasi ini ditunjukkan seperti pada Gambar (2.2).



Gambar 2.2. Sistem Pengaturan Level Single Loop

Sesuai dengan diagram blok pada Gambar (2.1) yang bertindak sebagai *plant* adalah tangki dengan prosesnya yang dikendalikan adalah ketinggian air pada tangki, sedangkan yang bertindak sebagai kontroler adalah *level controller*, *pneumatic control valve* berfungsi sebagai

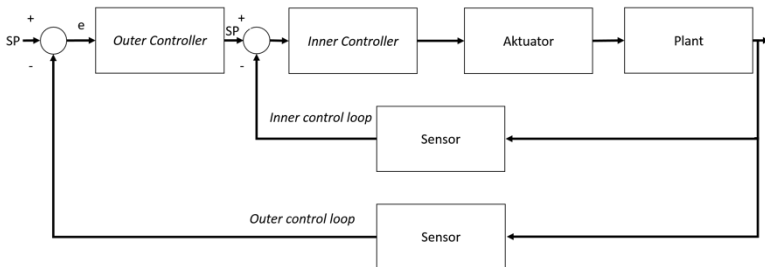
aktuator atau *final control element*, dan *level transmitter* berfungsi sebagai sensor. Sehingga, apabila direpresentasikan dalam diagram blok maka didapat seperti Gambar (2.3).



Gambar 2.3. Diagram Blok Sistem Pengaturan Level Single Loop

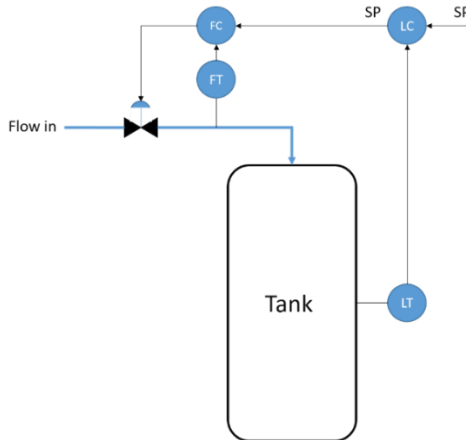
2.1.2. Cascade [1]

Struktur sistem pengaturan *cascade* atau biasa disebut juga dengan *master slave controller*, terdiri atas dua atau lebih *loop* control yang saling berinteraksi dengan diagram blok seperti pada Gambar (2.4). Proses yang berjalan lebih cepat dijadikan sebagai *inner loop*, sedangkan untuk proses yang berjalan lebih lambat dijadikan sebagai *outer loop*. Dalam sistem pengaturan konfigurasi *cascade* ini terdapat dua kontroler yang digunakan, yaitu *inner controller* dan *outer controller*, dimana *outer controller* memberikan *set point* pada *inner controller*, sedangkan dua buah sensor atau *measurement device* untuk mengukur dua variabel proses yang berbeda, dan hanya satu aktuator atau *final control element* yang digunakan.



Gambar 2.4. Diagram Blok Sistem Pengaturan Konfigurasi Cascade

Salah satu contoh implementasi dari konfigurasi ini adalah pengaturan *level* seperti yang terlihat pada Gambar (2.5). Proses pengendalian *level* sangat rentan mengalami gangguan akibat *flow rate* yang tidak konstan.



Gambar 2.5. Sistem Pengaturan Level dengan Konfigurasi Cascade

Pada proses pengendalian *level* air ini yang bertindak sebagai *inner loop* adalah proses *flow* karena memiliki respon yang lebih cepat daripada proses *level*, sehingga proses *level* ditempatkan pada *outer loop*. Kontroler dari proses *level* ini akan memberikan *set point* kepada kontroler *process flow* yang ditempatkan pada *inner loop*. Dari Gambar (2.5) dapat dilihat bahwa aktuator atau *final control element* yang digunakan hanya satu yaitu *pneumatic control valve* untuk mengatur laju aliran air yang masuk ke dalam tangki. Untuk sensor yang digunakan adalah dua sensor yang berbeda yaitu *level transmitter* yang ditempatkan pada *outer loop* dan *flow transmitter* yang ditempatkan pada *inner loop*.

Konfigurasi *cascade* ini memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan *single loop* yaitu:

- Mampu meredam *disturbance* yang terjadi pada *inner loop* sehingga tidak berakibat pada *outer loop*.
- Mampu mengkompensasi efek non-linier aktuator pada *inner loop* sehingga bisa didapatkan respon yang linier pada *outer loop*.

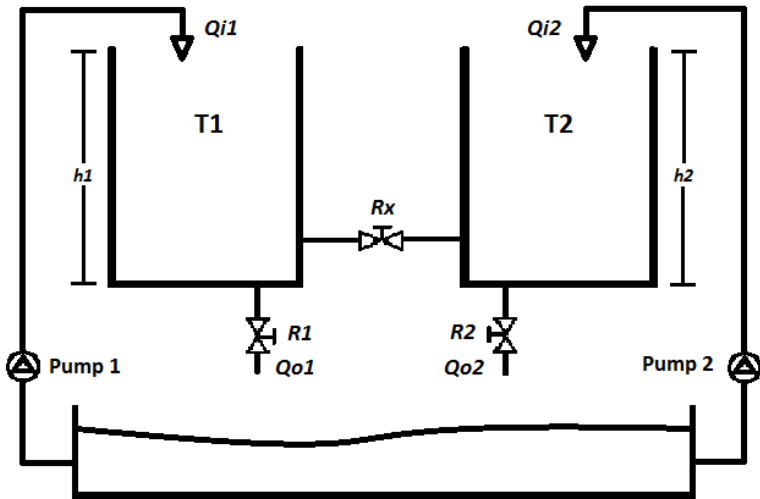
Pada konfigurasi *cascade* ini juga memiliki beberapa kelemahan dibandingkan dengan konfigurasi *single loop* yaitu:

- Membutuhkan tambahan sensor atau *measurement device* untuk bekerja.

- b. Adanya kontroler tambahan yang perlu di tuning parameter kontrolnya.
- c. Strategi control yang diterapkan lebih kompleks.

2.2. *Coupled Tanks* [2]

Plant coupled tanks merupakan tangki dengan konfigurasi dua tangki atau lebih yang saling berhubungan dengan sebuah pipa atau saluran air seperti pada Gambar (2.6). Adanya hubungan antara tangki ini membuat *level* cairan pada setiap tangki saling berhubungan atau berinteraksi. Konfigurasi tangki seperti ini banyak digunakan pada industri, seperti industri pembuatan kertas, industri pengolahan limbah, dan industri kimia.



Gambar 2.6. Model *Plant Coupled Tanks*

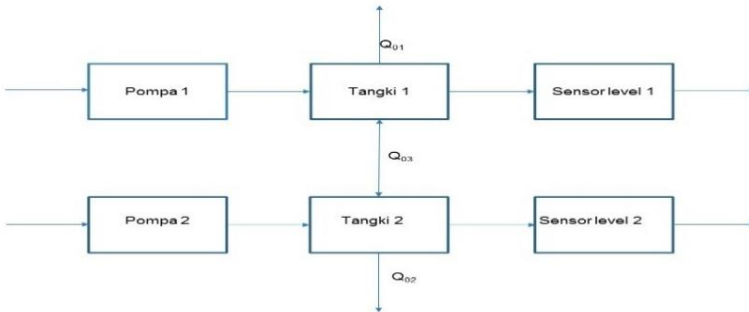
Level cairan pada tangki pertama ditunjukkan sebagai H_1 dan H_2 untuk *level* tangki kedua. *Flow* cairan yang masuk pada tangki dilambangkan sebagai Q_i . Untuk *flow* cairan yang keluar dari tangki ditunjukkan sebagai Q_b untuk tangki pertama, Q_c tangki kedua, dan Q_a sebagai *flow* interaksi antara tangki pertama dan tangki kedua. Sistem *coupled tanks* dapat dikonfigurasi sebagai sistem *Single Input Single Output* (SISO), *Multi Input Multi Output* (MIMO), atau *Single Input Multi*

Output (SIMO) berdasarkan manipulasi masukan pada pompa dan daerah kerja dari *rotary valve* yang terdapat pada *plant coupled tanks*. Jika berdasar model pada Gambar (2.1) maka *plant* ini bisa digolongkan sebagai sistem SIMO karena hanya memiliki satu masukan berupa aliran masuk air pada tangki satu dan untuk keluaran adalah *level* pada kedua tangki.

2.3. Pemodelan Sistem Pengaturan *Level Plant Coupled Tank*

Sistem yang akan dirancang adalah sistem pengaturan *level* dengan konfigurasi SISO yaitu pengaturan *level* pada tangki ke dua, dengan ditunjukkan masukan berupa tegangan pada pompa air untuk memberi aliran air masuk ke tangki dan *keluaran* berupa *level* air pada tangki satu atau dua. Model dari *plant coupled tank* seperti pada Gambar (2.6).

Proses pemodelan dimulai dari pemodelan pompa, pipa, tangki pada *plant coupled tanks*, dan sensor yang digunakan seperti pada Gambar (2.7).



Gambar 2.7. Diagram Blok Pemodelan Sistem Pengaturan *Level*

Parameter yang digunakan pada pemodelan sistem pengaturan *level* ini dapat dilihat pada Tabel (2.1). Dalam pemodelan suatu sistem diperlukan juga untuk mengetahui karakteristik dari komponen setiap penyusun sistem. Sebagai contoh pada pompa perlu diketahui berapa tegangan maksimal kerja pompa, cara kerja dari pompa. Dengan diketahui dengan detail mengenai karakteristik dari sistem maka model matematis yang akan dibuat bisa lebih akurat dan juga dalam *real* sistem maka akan

diketahui permasalahan yang timbul apabila ada karakteristik dari setiap komponen yang diabaikan.

Tabel 2.1. Paramater Pemodelan *Plant* [2]

Simbol	Keterangan	Satuan
Q_{i1}, Q_{i2}	Debit air yang masuk ke tangki	cm^3/s
Q_{o1}, Q_{o2}	Debit air yang keluar dari tangki 1 dan 2	cm^3/s
Q_{o3}	Debit air yang keluar dari tangki 1 menuju tangki 2	cm^3/s
H_1, H_2	Ketinggian air dalam tangki 1 dan 2	cm
A	Luas penampang	cm^2
a	Luas penampang lubang keluaran tangki 1 dan 2 dan saluran penghubung antara tangki 1 dan 2	cm^2
β_1, β_2	Rasio bukaan katup (<i>valve</i>) pada lubang keluaran tangki 1 dan 2	
β_x	Rasio <i>valve</i> antara tangki 1 dan 2	
$h_{1s(s)}, h_{2s(s)}$	Ketinggian air (<i>steady state</i>)	
g	Gravitasi	cm^2/s
k_1, k_2	<i>Gain</i> pompa 1 dan 2	

2.4. Pemodelan Sistem [2]

Sistem *coupled tank* terdiri dari dua tangki vertical interkoneksi oleh saluran aliran air yang menyebabkan ketinggian air dari dua tangki berinteraksi. Setiap tangki memiliki pompa independen untuk masukannya berupa cairan. Luas penampang dari bukaan katup dan dasar dari masing-masing tangki dan saluran menghubungkan dua tangki ini dapat divariasikan dengan *rotary valves*. Sistem *coupled tank* ini dapat dikonfigurasi sebagai SISO (*Single Output Single Input*) atau dapat juga sebagai sistem MIMO (*Multiple Output Multiple Input*) melalui manipulasi pompa *input* dan *sectional* daerah dari *rotary valves*.

Berdasarkan hukum kesetimbangan massa, didapat persamaan setiap tangki sebagai berikut:

$$A_1 \frac{dH_1}{dt} = Q_{i1} - Q_{o1} - Q_{o3} \quad (2.1)$$

$$A_2 \frac{dH_2}{dt} = Q_{i2} - Q_{o2} - Q_{o3} \quad (2.2)$$

Dimana H_1 dan H_2 masing-masing adalah ketinggian dari cairan yang terdapat pada tangki 1 dan tangki 2. Lalu A_1 dan A_2 adalah luas penampang yang dimiliki oleh tangki 1 dan tangki 2. Q_{i1} dan Q_{i2} adalah debit air yang dikeluarkan dari pompa yang masing-masing menuju ke tangki 1 dan menuju ke tangki 2. Sedangkan Q_{o1} dan Q_{o2} adalah debit air keluar yang dimiliki masing-masing tangki 1 dan tangki 2.

Dari persamaan *Bernoulli* untuk cairan non-kental, kemampuan cairan dalam aliran dapat direpresentasikan sebagai berikut:

$$Q_{o1} = \beta_1 \cdot a_1 \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{H_1}$$

$$Q_{o1} = \beta_1 \cdot a_1 \sqrt{2g \cdot H_1} \quad (2.3)$$

$$Q_{o2} = \beta_2 \cdot a_2 \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{H_2}$$

$$Q_{o2} = \beta_2 a_2 \sqrt{2g \cdot H_2} \quad (2.4)$$

$$Q_{o3} = \beta_x \cdot a_3 \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{H_1 - H_2}$$

$$Q_{o3} = \beta_x a_3 \sqrt{2g (H_1 - H_2)} \quad (2.5)$$

Dimana, β_1 , β_2 , dan β_3 merupakan konstanta proporsional dimana bergantung dari koefisien debit air area yang saling silang dan juga konstanta gravitasi. Dengan menggunakan Persamaan (2.3), Persamaan (2.4), dan Persamaan (2.5) ke Persamaan (2.1) dan Persamaan (2.2) didapatkan persamaan *non-linear* yang menggambarkan dinamika dari multi-*input* dan multi-*output* sistem berasal sebagai berikut:

$$A_1 \frac{dH_1}{dt} = Q_{i1} - \beta_1 a_1 \sqrt{2g \cdot H_1} - \beta_x a_3 \sqrt{2g \cdot (H_1 - H_2)} \quad (2.6)$$

$$A_2 \frac{dH_2}{dt} = Q_{i2} - \beta_2 a_2 \sqrt{2g \cdot H_2} - \beta_x a_3 \sqrt{2g \cdot (H_1 - H_2)} \quad (2.7)$$

Mengingat dengan adanya perubahan yang kecil dari Q_1 dan Q_2 di kedua *input control* pada masing-masing tangki, H_1 dan H_2 akan menjadi hasil perubahan dari *level* kedua tangki tersebut.

$$A_1 \frac{dH_1}{dt} = q_1 - \frac{\alpha_1}{2\sqrt{H_1}} h_1 - \frac{\alpha_3}{2\sqrt{H_1 - H_2}} (h_1 - h_2) \quad (2.8)$$

$$A_2 \frac{dH_2}{dt} = q_2 - \frac{\alpha_2}{2\sqrt{H_2}} h_2 + \frac{\alpha_3}{2\sqrt{H_1 - H_2}} (h_1 - h_2) \quad (2.9)$$

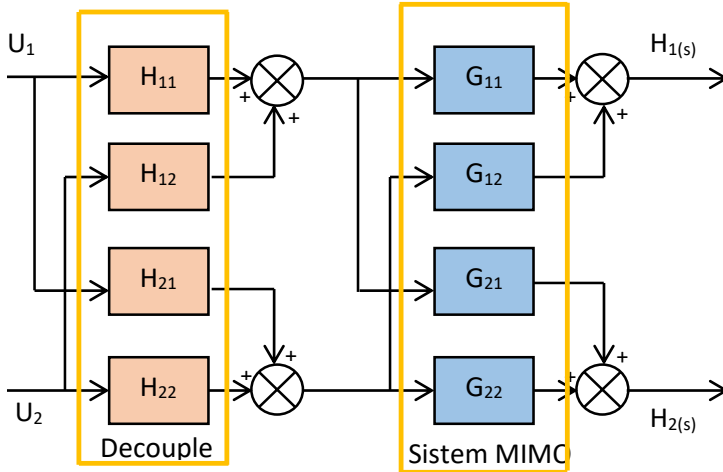
Dinamika *plant* ini dapat dimodelkan dengan persamaan diferensial sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{dH_1(t)}{dt} &= \frac{k_1}{A} U_1(t) - \frac{\beta_1 a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h_1}} H_1(t) + \dots \\ &\quad \frac{\beta_x a}{A} \sqrt{\frac{g}{2|h_2 - h_1|}} [H_2(t) - H_1(t)] \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{dH_2(t)}{dt} &= \frac{k_2}{A} U_2(t) - \frac{\beta_2 a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h_2}} H_2(t) + \dots \\ &\quad \frac{\beta_x a}{A} \sqrt{\frac{g}{2|h_2 - h_1|}} [H_2(t) - H_1(t)] \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.5. Decoupling [3]

Pada dunia industri, sering terjadi interaksi antara variabel *input-output*. Perubahan suatu *input* kadang tidak hanya berpengaruh pada satu *output* saja, melainkan berpengaruh juga pada *output* lain, atau yang disebut dengan *Multi Input Multi Output* (MIMO). Pemodelan sistem ini dapat dilihat pada Gambar (2.8).



Gambar 2.8. Sistem MIMO pada Coupled Tank

Plant Coupled-Tank memiliki dua *input* dan *output* yang punya pengaruh silang. Pada Gambar (2.8), *output* $h_1(t)$ tidak hanya dipengaruhi oleh $u_1(t)$ tetapi juga dipengaruhi oleh $u_2(t)$, begitu juga dengan $h_2(t)$. *Plant* pada proses semacam ini dapat disederhanakan seakan-akan seperti proses SISO dengan teknik *Decoupling*. *Decoupling* mentransformasikan model MIMO ke dalam SISO untuk memudahkan analisis dan perancangan kontroler.

Hubungan suatu *input* berpengaruh pada *output loop* lainnya. Penulisan model untuk Gambar (2.8) adalah:

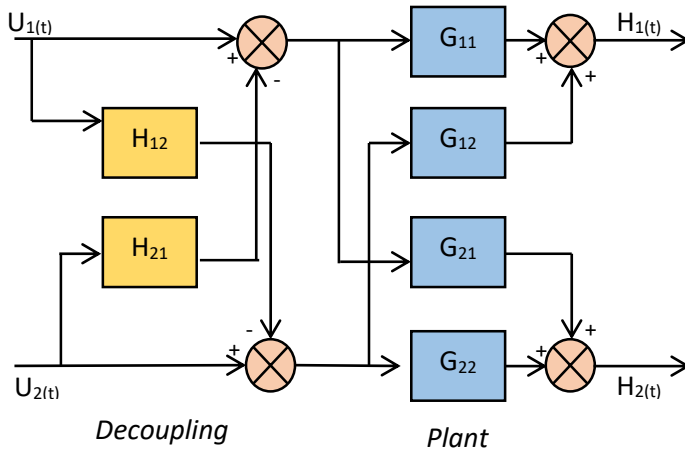
$$Y_1 = G_{11}X_1 + G_{12}X_2 \quad (2.12)$$

$$Y_2 = G_{21}X_1 + G_{22}X_2 \quad (2.13)$$

Untuk mengurangi interaksi dari *control loop*, dapat ditambahkan dengan dekopler pada konfigurasi *multi-loop* konvensional. Sistem kontrol dekopling memberikan dua keuntungan:

- Interaksi *control loop input* lain dihilangkan sehingga stabilitas sistem *closed loop* sistem ditentukan oleh karakteristik *feedback closed loop input* itu sendiri
- Perubahan *setpoint* pada satu pengubah terkendali tidak mempengaruhi pengubah-pengubah terkendali yang lain.

Salah satu jenis kontrol dekopling untuk proses dengan dua *input* dan dua *output* diperlihatkan pada Gambar (2.5). Tampak bahwa terdapat 2 dekopler D_{12} dan D_{21} yang berada sebelum diagram blok sistem MIMO.



Gambar 2.9. Sistem Dekopling pada Coupled Tanks

Dekopler dirancang untuk mengkompensasi interaksi proses yang tidak diinginkan. Untuk memperoleh persamaan pada tiap dekopler maka dilakukan analisa terpisah pada tiap *input-output*, sehingga diperoleh nilai D_{12} , sebagai berikut:

$$Y_1 = G_{11}X_1^* + G_{12}X_2$$

$$X_1^* = X_1 + D_{12}X_2$$

$$Y_1 = G_{11}X_1 + G_{11}D_{12}X_2 + G_{12}X_2$$

$$Y_1 = G_{11}X_1 + (G_{11}D_{12} + G_{12})X_2 \quad (2.14)$$

Agar *output* Y_1 hanya dipengaruhi nilainya dari *input* X_1 , nilai *input* X_2 harus sama dengan 0 ($X_2=0$), sehingga persamaan menjadi:

$$(G_{11}D_{12} + G_{12})X_2 = 0$$

$$G_{11}D_{12} + G_{12} = 0$$

$$D_{12} = -\frac{G_{12}}{G_{11}} \quad (2.15)$$

Untuk D_{21} diperoleh dari persamaan berikut:

$$Y_2 = G_{22}X_2^* + G_{21}X_1$$

$$X_2^* = X_2 + D_{21}X_1$$

$$Y_2 = G_{22}X_2 + G_{22}D_{21}X_1 + G_{21}X_1$$

$$Y_2 = G_{22}X_2 + (G_{22}D_{21} + G_{21})X_1 \quad (2.16)$$

Agar *output* Y_2 hanya dipengaruhi nilainya dari *input* X_2 , nilai *input* X_1 harus sama dengan 0 ($X_1=0$), sehingga persamaan menjadi:

$$(G_{22}D_{21} + G_{21})X_1 = 0$$

$$G_{22}D_{21} + G_{21} = 0$$

$$D_{21} = -\frac{G_{21}}{G_{22}} \quad (2.17)$$

2.6. MATLAB [4]

MATLAB merupakan paket program dengan bahasa pemrograman yang tinggi untuk mengembangkan algoritma, visualisasi data, dan komputasi numerik. Program MATLAB ini dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah komputasi dengan lebih cepat dibandingkan dengan bahasa pemrograman tradisional, seperti *C*, *C++*, dan *Fortran*. MATLAB digunakan untuk banyak aplikasi seperti *signal and image processing*, desain kontrol, pengujian dan pengukuran, permodelan, dan analisis.

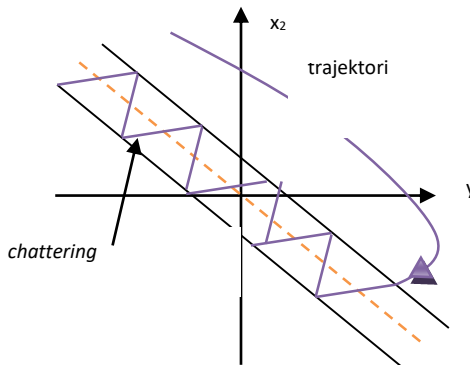
Simulink merupakan bagian dari MATLAB untuk memodelkan, mensimulasikan, dan menganalisa sistem dinamik. *Simulink* dapat membentuk model dari awal atau memodifikasi model yang sudah ada sesuai dengan apa yang diinginkan. Selain itu *simulink* juga mendukung sistem *linear* dan *non-linear*, pemodelan waktu kontinu atau diskrit, atau gabungan. *Simulink* ini dapat digunakan sebagai media untuk menyelesaikan masalah dalam industry nyata meliputi kedirgantaraan dan pertahanan, otomotif, komunikasi, elektronik, dan pemrosesan sinyal.

Salah satu modul dalam *simulink* yang dapat digunakan untuk komunikasi perangkat keras adalah *Instrument Control Toolbox*. Modul ini merupakan kumpulan fungsi *m-file* yang dibangun pada lingkungan komputasi teknis MATLAB. *Toolbox* ini menyediakan kerangka kerja untuk komunikasi instrumen yang mendukung *GPIB interface*, standar *VISA*, *TCP/IP*, dan protokol *UDP*. *Toolbox* ini memperluas fitur dasar *serial port* yang ada dalam MATLAB. Selain itu, *toolbox* ini berfungsi untuk komunikasi data antara *workspace* MATLAB dan peralatan lainnya. Data tersebut dapat berbentuk biner atau *text*.

Komunikasi *serial* merupakan protokol dasar tingkat rendah untuk komunikasi antara dua peralatan atau lebih. Pada umumnya satu komputer dengan *modem*, *printer*, *microcontroller*, atau peralatan lainnya. *Serial port* mengirim dan menerima informasi *bytes* dengan hubungan seri. *bytes* tersebut dikirimkan menggunakan format biner atau karakter ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). Dalam komunikasi serial MATLAB, agar data ASCII dapat diproses *real time*, maka digunakan ASCII *encode* dan *decode* yang terdapat pada *xPC Target Library for RS232*. ASCII *encode* merupakan blok dalam *Simulink* yang digunakan untuk mengubah data *bytes* menjadi karakter ASCII. Sedangkan ASCII *decode* merupakan blok *simulink* yang digunakan untuk mengubah karakter ASCII menjadi data *bytes* yang kemudian dapat dikonversi sesuai kebutuhan.

2.7. Sliding Mode Control [5]

Sliding mode control merupakan salah satu teknik kendali untuk sistem *linear* maupun *non-linear*. Pengendalian yang dilakukan dengan memaksa trajektori *state* suatu sistem untuk menuju ke dalam sebuah permukaan luncur tertentu. Setelah sampai ke permukaan luncur tersebut sinyal kendali berusaha mempertahankan agar trajektori status tetap berada disana. *Sliding mode control* termasuk kategori kendali umpan balik berkecepatan tinggi (*high speed switching feedback control*). Hal ini mengakibatkan trajektori status di sekitar permukaan luncur berosilasi dengan frekuensi tinggi (*chattering*). Tentu saja osilasi tersebut menjadi permasalahan stabilitas yang tidak dapat dihiraukan begitu saja. Pada Gambar (2.10) dapat dijelaskan bahwa permasalahan dari *sliding mode control* dapat dibagi ke dalam dua kategori besar, yaitu masalah *hitting time* dan *chattering*. *Hitting time* adalah waktu yang dibutuhkan oleh trajektori status dari suatu sistem dari kondisi awalnya menuju permukaan luncur yang telah ditentukan.



Gambar 2.10. Diagram Fasa Trajektori Status

2.7.1. Representasi Sistem dalam *State-Space* [5]

Salah satu cara untuk merepresentasikan hubungan *input-output* suatu *plant* adalah dengan menggunakan fungsi penghantar seperti ditunjukkan pada Persamaan (2.18):

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (2.18)$$

$$G(s) = \frac{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} \quad (2.19)$$

Fungsi penghantar tersebut dapat juga ditulis dalam bentuk persamaan diferensial, dengan asumsi semua keadaan awal adalah nol:

$$y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_0 y = b_n u^{(n)} + \dots + b_{n-1} u^{(n-1)} + \dots + b_0 u \quad (2.20)$$

Dengan memilih:

$$\begin{aligned} x_1 &= y - \beta_0 u \\ x_2 &= \dot{y} - \beta_0 \dot{u} - \beta_1 u = \dot{x}_1 - \beta_1 u \\ x_3 &= \ddot{y} - \beta_0 \ddot{u} - \beta_1 \dot{u} - \beta_2 u = \dot{x}_2 - \beta_2 u \\ &\vdots \\ &\vdots \\ x_n &= y^{(n-1)} - \beta_0 u^{(n-1)} - \dots - \beta_{n-1} u = \dot{x}_{n-1} - \beta_{n-1} u \end{aligned} \quad (2.21)$$

Di mana:

$$\begin{aligned} \beta_0 &= b_0 \\ \beta_1 &= b_1 - a_1 \beta_0 \\ \beta_2 &= b_2 - a_1 \beta_1 - a_2 \beta_0 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \beta_n &= y^{(n-1)} - \beta_0 u^{(n-1)} - \dots - \beta_{n-1} u = \dot{x}_{n-1} - \beta_{n-1} u \end{aligned} \quad (2.22)$$

Maka:

$$\begin{aligned}
x_1 &= x_2 + \beta_1 u \\
x_2 &= x_3 + \beta_2 u \\
&\vdots \\
&\vdots \\
x_{n-1} &= x_n + \beta_{n-1} u \\
x_n &= -a_n x_1 - a_{n-1} x_2 - \dots - a_1 x_n + \beta_n u
\end{aligned} \tag{2.23}$$

Sehingga didapatkan matriks:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{n-1} \\ \beta_n \end{bmatrix} u \tag{2.24}$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \beta_0 u$$

Atau dalam bentuk umum persamaan *state* :

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{2.25}$$

$$y = Cx + Du \tag{2.26}$$

Persamaan (2.25) dan Persamaan (2.26) merupakan representasi sistem dalam persamaan *state space*. Variabel yang dipilih sebagai variabel *state* tidak harus keluaran sistem seperti representasi fungsi penghantar, tetapi dapat juga digunakan variabel yang lain misalnya sinyal *error* atau kombinasi *linear* sinyal.

2.7.2. *Sliding Surface* [5]

Semua *state space* dari suatu sistem yang menyebabkan kondisi *Sliding mode* dapat terjadi disebut *sliding surface* (permukaan luncur).

Sebuah sistem yang mencapai *sliding surface* memiliki keuntungan dua kali lipat, pertama terjadi pereduksian orde sistem dan kedua tidak sensitif terhadap parameter yang mutlak pada saluran *input*.

Sliding surface dipilih dengan pertimbangan status trayektori sistem dapat menuju permukaan tersebut di manapun kondisi awalnya dan dalam waktu yang terbatas serta status trayektori sistem dapat dipertahankan di sekitar *sliding surface*. *Sliding surface* secara umum didesain dengan menggunakan kombinasi linier variabel *state*. *Sliding surface* didefinisikan sebagai $\sigma(x)$:

$$s \cdot x(t) = 0 \quad (2.27)$$

Di mana x adalah vektor *state* sistem dan S adalah *matriks* permukaan luncur dengan nilai elemen ditentukan sendiri dan nilai n adalah orde sistem.

2.7.3. Formulasi Sinyal Kontrol [5]

Sinyal kontrol merupakan sinyal yang mengendalikan keluaran untuk dapat mengikuti atau mendekati sinyal referensi yang ditentukan. Untuk mendapatkan sinyal kontrol yang mampu membawa status trayektori menuju permukaan luncur dan mempertahankan status trayektori agar tetap berada di sekitar permukaan luncur diperlukan dua macam sinyal kontrol.

Syarat kestabilan *Lyapunov* digunakan dalam perancangan sinyal kontrol ini. Syarat kestabilan *Lyapunov* ditunjukkan pada Persamaan (2.28).

$$\sigma(x) \times \dot{\sigma}(x) < 0 \quad (2.28)$$

Sinyal kontrol yang pertama adalah sinyal kontrol ekivalen yang berfungsi untuk membawa status trayektori menuju permukaan luncur (u_{eq}) dan sinyal kontrol yang kedua adalah sinyal kontrol natural yang berfungsi untuk mempertahankan status trayektori agar tetap berada di sekitar permukaan luncur (u_N). Sehingga sinyal kontrol total merupakan penjumlahan dari dua sinyal kontrol tersebut.

$$u = u_{eq} + u_N \quad (2.29)$$

Dari Persamaan (2.25) dan Persamaan (2.29), maka persamaan *state* juga dapat dituliskan seperti pada Persamaan (2.30).

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + B(u_{eq} + u_n) \\ \dot{x} &= Ax + Bu_{eq} + Bu_n\end{aligned}\tag{2.30}$$

Sinyal kontrol ekivalen merupakan sinyal yang membawa status trayektori menuju permukaan luncur. Pada saat status trayektori tidak berada pada permukaan luncur ($\sigma(x)$ tidak bernilai 0). Nilai $\sigma(x) > 0$ ketika status trayektori berada di atas permukaan luncur sedangkan nilai $\sigma(x) < 0$ ketika status trayektori berada di bawah permukaan luncur. Sehingga dapat dituliskan menjadi:

$$\begin{aligned}\dot{\sigma}(x) &= 0 \\ S\dot{x} &= 0 \\ S(Ax + Bu_{eq} + Bu_N) &= 0\end{aligned}\tag{2.31}$$

Pada perhitungan sinyal kontrol ekivalen, sinyal kontrol natural dianggap nol, sehingga:

$$\begin{aligned}SA_x + SBu_{eq} &= 0 \\ SBu_{eq} &= -SAx \\ u_{eq} &= -(SB)^{-1} SAx\end{aligned}\tag{2.32}$$

Perhitungan sinyal kontrol natural:

$$\begin{aligned}\dot{\sigma}(x) &= SAx + SBu_{eq} + SBu_N \\ \dot{\sigma}(x) &= SAx + SB(-SB)^{-1} SAx + SBu_N \\ \dot{\sigma}(x) &= SAx - SB(SB)^{-1} SAx + SBu_N \\ \dot{\sigma}(x) &= SAx - SAx + SBu_N \\ \dot{\sigma}(x) &= SBu_N\end{aligned}\tag{2.33}$$

Untuk mempertahankan trayektori *state* tetap berada pada permukaan luncur, maka syarat kestabilan *Lyapunov* pada Persamaan (2.28) harus terpenuhi. Sehingga:

- a. Pada saat $\sigma(x) < 0$ maka haruslah turunan $\dot{\sigma}(x) > 0$
- b. Pada saat $\sigma(x) > 0$ maka haruslah turunan $\dot{\sigma}(x) < 0$

Dari syarat kestabilan *Lyapunov* diatas, maka dapat dipilih:

$$\dot{\sigma}(x) = -W \cdot \text{sat}(\sigma(x)) \quad (2.34)$$

Di mana $W > 0$ dan dipilih berdasarkan posisi trayektori pada permukaan luncur agar didapat *chattering* yang tidak terlalu besar, dengan demikian dari Persamaan (2.34) didapatkan Persamaan (2.35) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} SBu_N &= -W \cdot \text{sat}(\sigma(x)) \\ u_N &= -(SB)^{-1} W \cdot \text{sat}(\sigma(x)) \end{aligned} \quad (2.35)$$

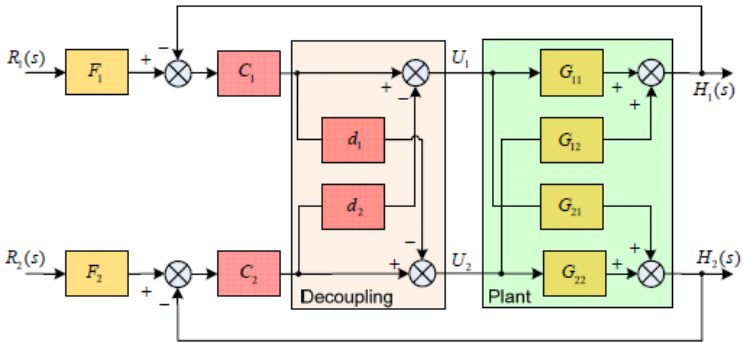
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III PERANCANGAN SISTEM

Pada Bab III ini akan dibahas mengenai perancangan sistem pengaturan *level* fluida pada simulator *plant coupled tanks*. Dimulai dari pemodelan *plant coupled tanks*, desain *decoupler*, dan perancangan *sliding mode controller*.

3.1. Gambaran Umum Sistem

Sistem yang akan dibangun pada penelitian ini merupakan sistem pengaturan *level* dan *flow* dengan menggunakan *decoupling controllers*. Dimana *decoupling controllers* ini digunakan untuk menghilangkan pengaruh dari *coupling* silang yang terdapat pada *plant coupled tank*. [2]



Gambar 3.1. Diagram Blok Sistem Pengaturan Level Plant Coupled Tanks

Sedangkan simulator yang digunakan untuk mensimulasikan *plant* yang berdasarkan dari pemodelan matematis menggunakan *simulink* pada MATLAB.

3.2. Pemodelan Coupled Tank

Model matematis yang didapatkan dari sistem didapatkan dari memanfaatkan hukum fisika adalah sebagai berikut:

$$A_1 \frac{dH_1}{dt} = Q_{i1} - Q_{o1} + Q_{o3} \quad (3.1)$$

$$A_2 \frac{dH_2}{dt} = Q_{i2} - Q_{o2} - Q_{o3} \quad (3.2)$$

$$Q_{o1} = \beta_1 \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_1} = \beta_1 \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_1} \quad (3.3)$$

$$Q_{o2} = \beta_2 \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_2} = a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_2} \quad (3.4)$$

$$Q_{o3} = \beta_x \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot |H_1 - H_2|} = \beta_x \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot |H_1 - H_2|} \quad (3.5)$$

Dengan menggunakan Persamaan (3.3), (3.4), (3.5) ke dalam Persamaan (3.1) dan Persamaan (3.2) maka dapat diperoleh persamaan *non-linear* yang merepresentasikan dinamika *multi-input* dan *multi-output* sistem sebagai berikut:

$$A_1 \frac{dH_1}{dt} = Q_{i1} - \beta_1 \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_1} + \dots \\ \beta_x \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot |H_1 - H_2|} \quad (3.6)$$

$$A_2 \frac{dH_2}{dt} = Q_{i2} - \beta_2 \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_2} + \dots \\ \beta_x \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot |H_1 - H_2|} \quad (3.7)$$

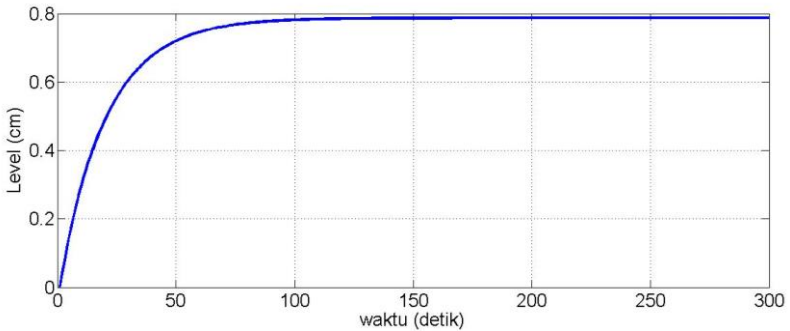
Dimana:

Tabel 3.1. Nilai Paramater Pemodelan *Plant* [2]

Simbol	Keterangan	Satuan	Nilai
H ₁ , H ₂	Ketinggian air dalam tangki 1 dan 2	cm	40
A	Luas penampang	cm ²	66,25
a	Luas penampang lubang keluaran tangki 1 dan 2 dan saluran penghubung antara tangki 1 dan 2	cm ²	0,1963
β ₁ , β ₂	Rasio bukaan katup (<i>valve</i>) pada lubang keluaran tangki 1 dan 2		0,35903
β _x	Rasio <i>valve</i> antara tangki 1 dan 2		0,38705
g	Gravitasi	m ² /s	9,8

Simbol	Keterangan	Satuan	Nilai
Q_{i1}	Debit air yang masuk pada tangki 1	cm^3/s	2,88
Q_{i2}	Debit air yang masuk pada tangki 2	cm^3/s	2,588

Setelah memasukkan parameter di atas pada model *non-linear*, kemudian disimulasikan pada MATLAB R2013a untuk mendapatkan model linier dalam bentuk *transfer function* berupa transformasi *laplace* pada model *plant coupled tanks* dengan cara pendekatan model respon *steady state* dimana respon dari *close loop* model *non-linear* diberikan masukan berupa sinyal *step* bernilai 1 untuk H_1 dan H_2 untuk mendapatkan model linier dari *plant* dalam bentuk *laplace*.

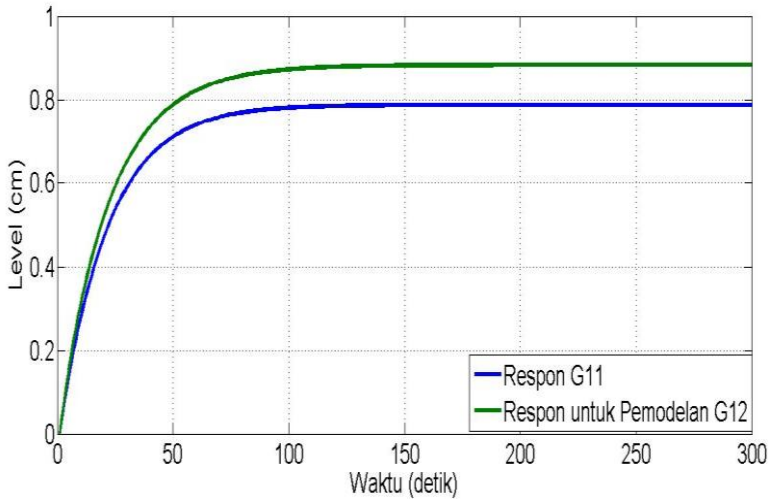


Gambar 3.2. Respon Non-Linear G_{11}

Dengan hasil *close loop* dari model *non-linear* seperti Gambar (3.2) dengan memberikan masukan berupa sinyal *step* pada H_1 dengan nilai 1 dan nilai 0 pada H_2 sehingga didapatkan nilai G_{11} dengan mendapatkan nilai *steady state* pada H_1 105 detik dengan spesifikasi $T_s \pm 2\%$, maka didapatkan nilai $\tau = 105/5 = 21$ detik, maka model *linear* untuk G_{11} adalah:

$$G_{11} = \frac{0,7874}{21s+1} \quad (3.8)$$

Kemudian dilakukan hal yang sama untuk mendapatkan nilai dari G_{12} yaitu simulasi *close loop* dari model *non-linear* dari *plant* dengan diberikan masukan sinyal *step* untuk H_1 dan H_2 dengan sinyal *step* bernilai 1 sehingga didapat model linier *plant* untuk G_{12} .

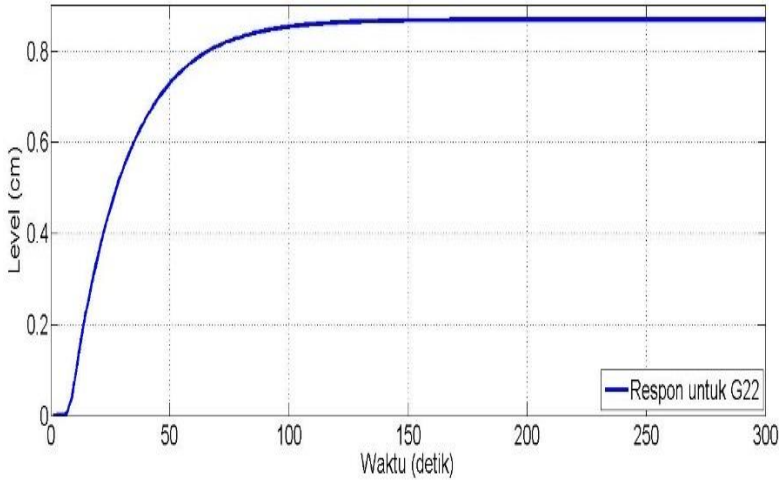


Gambar 3.3. Respon Non-Linear G_{12}

Dengan hasil *close loop* pada model *non-linear* pada Gambar (3.3) maka didapatkan nilai G_{12} dengan mendapatkan nilai *steady state* pada 155 detik dengan spesifikasi $T_s \pm 2\%$, maka didapatkan nilai untuk $\tau = 155/5 = 32$ detik. Maka didapatkan nilai gain sebesar 0,08386 dari menghitung selisih dari hasil antara respon G_{11} dan hasil respon *close loop* H_1 . Sehingga model *linear* untuk G_{12} adalah:

$$G_{12} = \frac{0,0946}{31s+1} \quad (3.9)$$

Untuk mendapatkan nilai G_{22} dilakukan proses yang sama, yaitu dengan melalui simulasi *close loop* pada model *non-linear* dengan diberikan masukan berupa sinyal *step* yang bernilai 0 untuk H_1 dan 1 untuk H_2 sehingga didapatkan respon *steady state* untuk G_{22} .

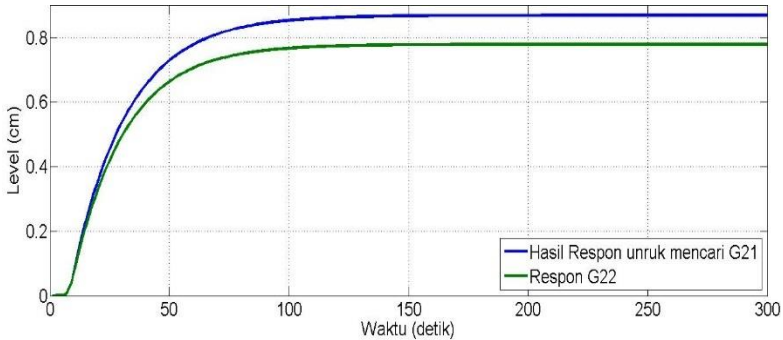


Gambar 3.4. Respon Non-Linear G_{22}

Dengan hasil *close loop* pada model *non-linear* di atas maka didapatkan nilai G_{22} dengan nilai *steady state* pada 110 detik dengan spesifikasi $T_s \pm 2\%$, sehingga didapatkan nilai $\tau = 110/5 = 22$ detik, maka didapatkan model *linear* untuk G_{22} seperti berikut:

$$G_{22} = \frac{0,7829}{22s+1} \quad (3.10)$$

Untuk mendapatkan nilai G_{21} dengan melakukan proses yang sama yaitu dengan melakukan simulasi *close loop* pada model *non-linear* dengan diberikan masukan sinyal *step* yang bernilai 1 untuk H_1 dan H_2 sehingga didapatkan respon *steady state* untuk G_{21} sebagai berikut:



Gambar 3.5. Respon Non-Linear G_{21}

Dengan hasil dari *close loop* model *non-linear* di atas maka didapatkan nilai G_{21} dengan nilai *steady state* pada 145 detik dengan spesifikasi $T_s \pm 2\%$, maka didapatkan nilai dari $\tau = 145/5 = 29$ detik. Maka didapatkan nilai gain sebesar 0,08915 dari menghitung selisih dari hasil antara respon G_{22} dan hasil respon *close loop* H_2 . Sehingga model *linear* G_{21} adalah:

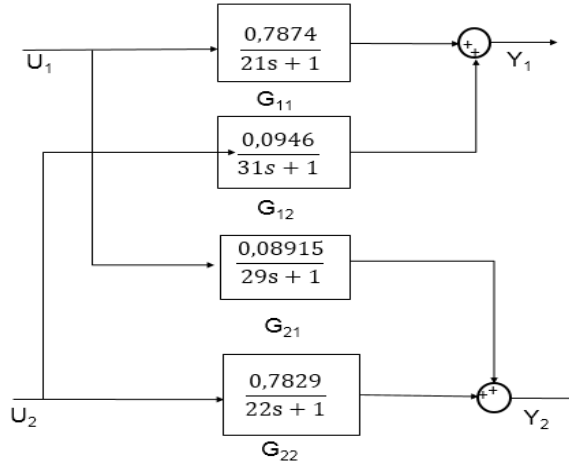
$$G_{21} = \frac{0,08915}{29s+1} \quad (3.11)$$

3.3. *Transfer Function Coupled Tank*

Bentuk *transfer function* hasil dari identifikasi sistem sebelumnya yaitu :

$$\begin{bmatrix} h_1(s) \\ h_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Dengan u_1 , u_2 , h_1 , h_2 merupakan nilai dari debit air yang masuk untuk tangki 1 dan 2 serta tinggi tangki 1 dan tangki 2.



Gambar 3.6. Pemodelan Linier dengan Pendekatan Respon Steady State

Gambar (3.6) merupakan bentuk konfigurasi MIMO untuk transfer function dari *coupled tank plant*. Persamaan (3.8) sampai Persamaan (3.11) merupakan *transfer function coupled tank plant* hasil pemodelan sistem.

3.4. Desain Decoupling

Pada sistem *coupled tank plant* ini, masing-masing input mempengaruhi kedua *output*. Oleh karena itu, dirancang suatu metode dekopling untuk menghilangkan pengaruh interaksi *input-output*. Dekopling yang akan dirancang ini, dapat meminimalisir gangguan pada *plant*, ketika salah satu input diberi gangguan sehingga membuat *plant* menjadi lebih stabil.

Persamaan dekopling didapat dari memasukkan nilai matriks *transfer function coupled tank plant* yang telah didapatkan dari Persamaan (3.8), (3.9), (3.10), dan (3.11). Persamaan matriks didapat dari penghitungan sebagai berikut:

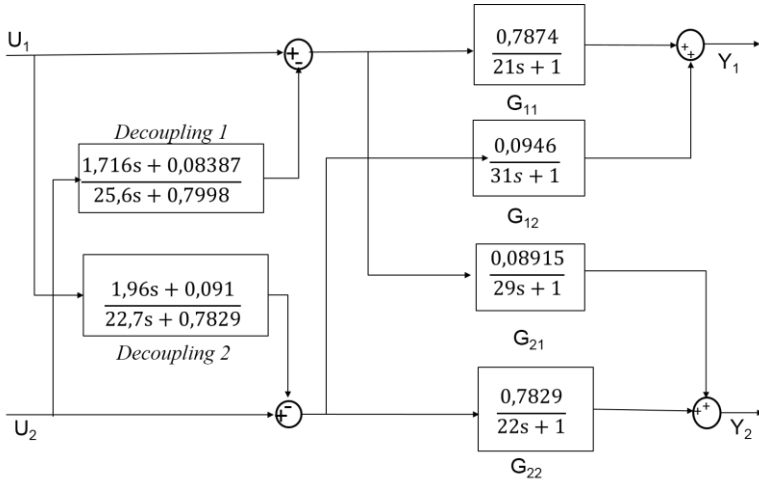
$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \\ \frac{-G_{21}(s)}{G_{22}(s)} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Transfer function yang didapat adalah sebagai berikut:

$$D_{12}(s) = \frac{1,716s+0,08387}{25,6s+0,7998} \quad (3.14)$$

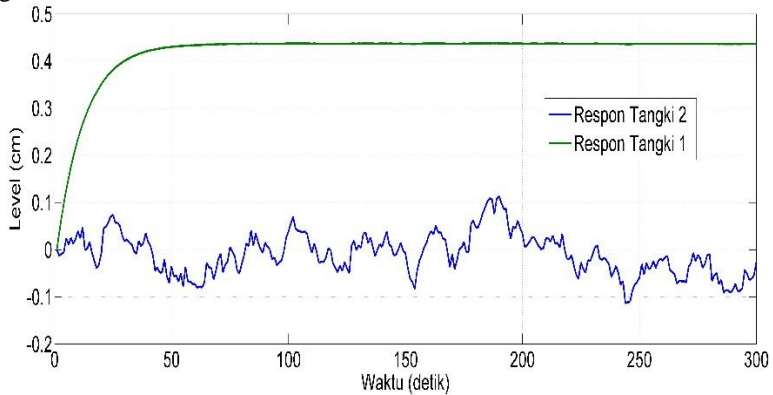
$$D_{21}(s) = \frac{1,96s+0,0891}{22,7s+0,7829} \quad (3.15)$$

Gambar dekopling sistem pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar (3.7). Dengan adanya metode dekopling pada sistem, maka output Y_1 hanya dipengaruhi oleh input u_1 . Sedangkan output Y_2 dipengaruhi oleh input u_2



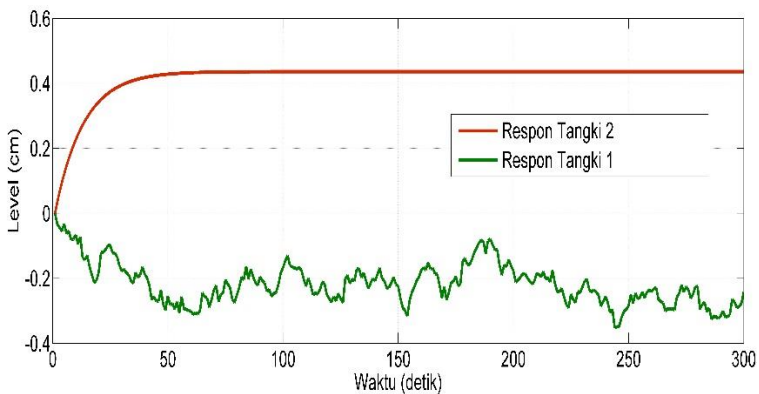
Gambar 3.7. Fungsi Alih Decoupling

Respon sistem setelah dipasang dekopling ditunjukkan pada gambar berikut



Gambar 3.8. Hasil Respon Menggunakan *Decoupling* pada H_1

Setelah diperoleh nilai dekopler D_{12} dan D_{21} , maka perlu diuji apakah dekopler sudah dapat menghilangkan interaksi antar *input*. Pengujian dekopling dilakukan dengan memberi sinyal random dari *input* u_2 . Hasil respon pada sistem saat *input* u_2 diberi gangguan ditunjukkan pada Gambar (3.9).



Gambar 3.9. Hasil Respon Menggunakan *Decoupling* pada H_2

Dari Gambar (3.9) terlihat apabila gangguan diberikan pada sistem *level*, maka *output* yang terpengaruh hanya pada sistem *level*, sedangkan pada sistem *pressure* tidak terpengaruh dari gangguan. Sedangkan ketika pengujian dekopling dilakukan dengan memberi sinyal random dari *input* u_1 . Hasil respon pada sistem *level* tidak ikut terpengaruh.

3.5. Fungsi Alih Keseluruhan

Berdasarkan pemodelan dari setiap komponen penyusun sistem ini seperti pada Gambar (1.2) didapatkan fungsi alih keseluruhan dari sistem seperti pada Persamaan (3.16) untuk $G_1(s)$ dan (3.7) untuk $G_2(s)$.

$$G_1(s) = \frac{577,7s^2 + 37,88s + 0,6187}{1,526e04s^3 + 1729s^2 + 64,2s + 0,7829} \quad (3.16)$$

$$G_2(s) = \frac{577,7s^2 + 37,88s + 0,6187}{1,63e04s^3 + 1816s^2 + 66,39s + 0,7998} \quad (3.17)$$

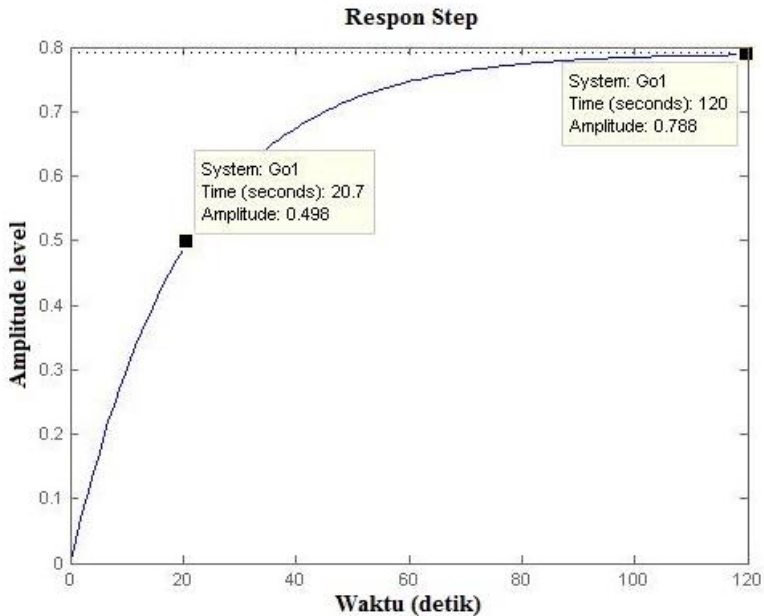
3.6. Analisa Reduksi Bode [5]

Analisa reduksi *bode* ini digunakan untuk mengkompensasi kerja sistem agar lebih mudah. Dimana penentuan fungsi alih ditentukan dari respon yang dihasilkan oleh fungsi alih yang didapatkan dari pemodelan dari sistem.

Diagram *bode* sendiri terdiri dari dua kurva. Yang pertama adalah kurva magnitude dari fungsi alih $20 \log |G(j\omega)|$ terhadap frekuensi dengan skala logaritmis. Lalu yang kedua adalah kurva sudut fasa fungsi alih $\angle G(j\omega)$ terhadap frekuensi dengan skala logaritmis.

3.6.1. Reduksi Bode Tangki 1

Dari Persamaan (3.16) didapatkan respon *step* dari sistem seperti yang ditunjukkan pada Gambar (3.10).

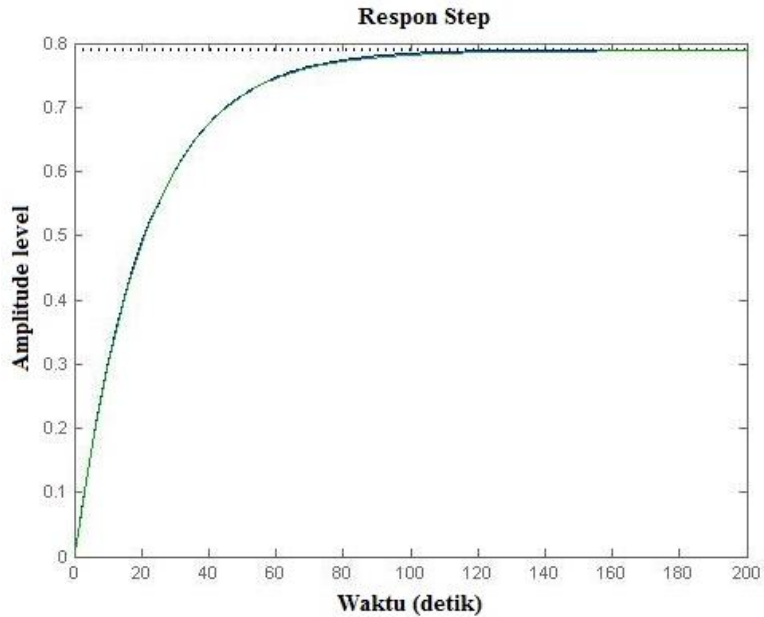


Gambar 3.10. Respon Step Fungsi Alih Tangki 1

Dari Gambar (3.10) dapat dilihat bahwa *amplitude* maksimum respon adalah 0,788 dengan waktu yang dibutuhkan selama 120 detik. Sehingga dari parameter yang didapatkan dapat dibentuk fungsi alih reduksi dari respon tersebut. Dimana *amplitude* maksimum dari respon tersebut dikalikan dengan 0,632. Dan hasil dari perkalian tersebut digunakan untuk mencari *rise time* dari respon. Didapatkan hasil perkalian bernilai 0,498 dengan waktu yang dibutuhkan untuk mencapainya selama 20,7 detik. Sehingga fungsi alih dapat direduksi menjadi Persamaan (3.18).

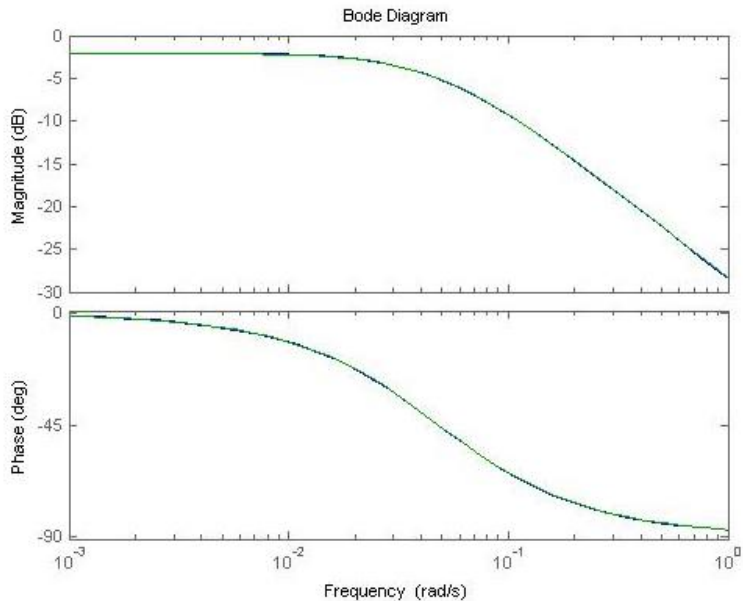
$$g_1 = \frac{0,788}{20,7s+1} \quad (3.18)$$

Sehingga didapatkan respon dari Persamaan (3.16) dan Persamaan (3.18) seperti pada Gambar (3.11). Sedangkan pada Gambar (3.12) adalah perbandingan *bode* diagramnya.



Gambar 3.11. Respon Step Fungsi Alih Reduksi Tangki 1

Dari Gambar (3.11) dapat dilihat bahwa hasil respon *step* Persamaa (3.18) memiliki kesamaan antara waktu dan *amplitude* dengan respon *step* dari Persamaan (3.16). Sehingga Persamaan (3.18) dapat digunakan untuk merancang kontroler pada tangki 1.

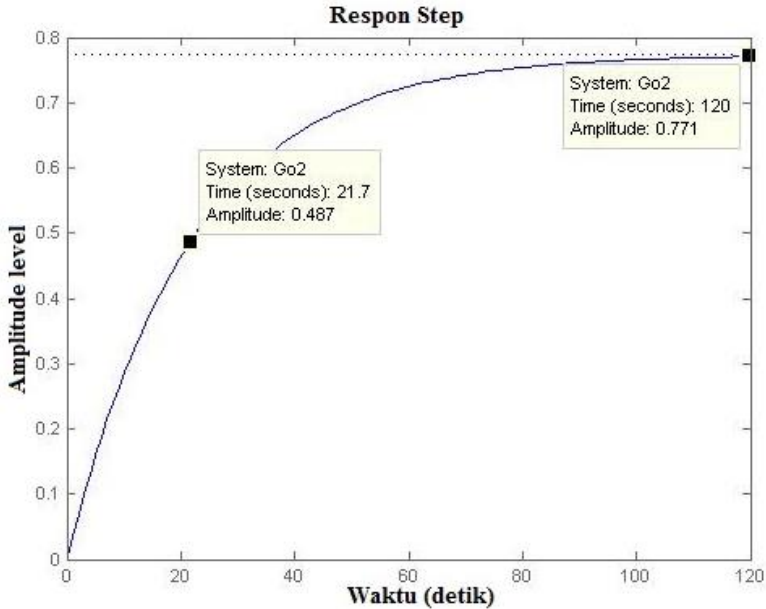


Gambar 3.12. Diagram *Bode* dari Fungsi Alih Tangki 1

Dari Gambar (3.12) dapat dilihat bahwa dari Persamaan (3.16) dan Persamaan (3.18) telah memiliki nilai dan bentuk *magnitude* dan *phase* yang sama. Sehingga Persamaan (3.18) dapat digunakan untuk merancang kontroler untuk tangki 1.

3.6.2. Reduksi *Bode* Tangki 2

Dari Persamaan (3.17) didapatkan respon *step* dari sistem seperti yang ditunjukkan pada Gambar (3.13).

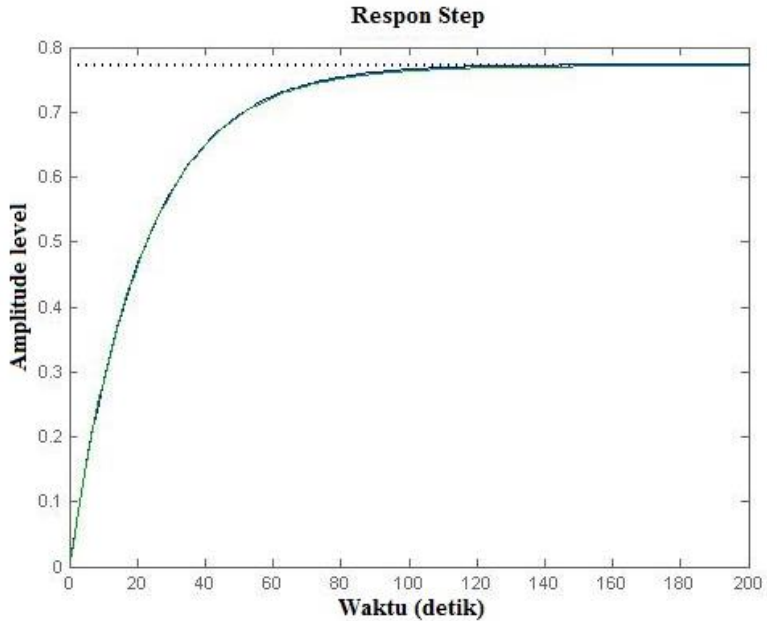


Gambar 3.13. Respon Step Fungsi Alih Tangki 2

Dari Gambar (3.13) dapat dilihat bahwa *amplitude* maksimum respon adalah 0,771 dengan waktu yang dibutuhkan selama 120 detik. Sehingga dari parameter yang didapatkan dapat dibentuk fungsi alih reduksi dari respon tersebut. Dimana *amplitude* maksimum dari respon tersebut dikalikan dengan 0,632. Dan hasil dari perkalian tersebut digunakan untuk mencari *rise time* dari respon. Didapatkan hasil perkalian bernilai 0,487 dengan waktu yang dibutuhkan untuk mencapainya selama 21,7 detik. Sehingga fungsi alih dapat direduksi menjadi Persamaan (3.19).

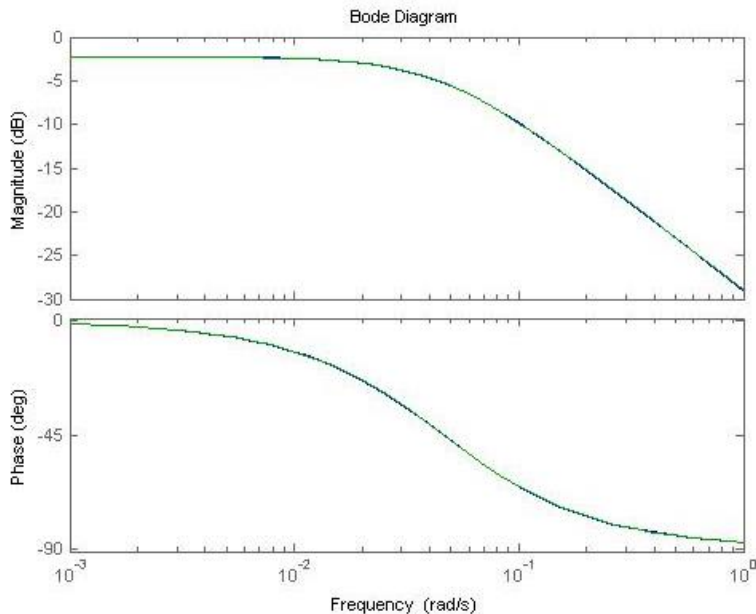
$$g_2 = \frac{0,771}{21,7s+1} \quad (3.19)$$

Sehingga didapatkan respon dari Persamaan (3.17) dan Persamaan (3.19) seperti pada Gambar (3.14). Sedangkan pada Gambar (3.15) adalah perbandingan *bode* diagramnya.



Gambar 3.14. Respon *Step* Fungsi Alih Reduksi Tangki 2

Dari Gambar (3.14) dapat dilihat bahwa hasil respon *step* Persamaa (3.19) memiliki kesamaan antara waktu dan *amplitude* dengan respon *step* dari Persamaan (3.17). Sehingga Persamaan (3.19) dapat digunakan untuk merancang kontroler pada tangki 2.



Gambar 3.15. Diagram Bode dari Fungsi Alih Tangki 2

Dari Gambar (3.15) dapat dilihat bahwa dari Persamaan (3.17) dan Persamaan (3.19) telah memiliki nilai dan bentuk *magnitude* dan *phase* yang sama. Sehingga Persamaan (3.19) dapat digunakan untuk merancang kontroler untuk tangki 2.

3.7. Perancangan Kontroler *Sliding Mode*

Perancangan kontroler didesain dan diimplementasikan untuk mempercepat *rise time* dan menjadikan respon mencapai *set point* yang diinginkan. Pada hasil identifikasi menggunakan analisa reduksi *bode*, didapat fungsi alih dari *plant* seperti berikut:

$$g_1 = \frac{0,788}{20,7s+1} \quad (3.20)$$

$$g_2 = \frac{0,771}{21,7s+1} \quad (3.21)$$

Dari Persamaan (3.20) dan Persamaan (3.21) akan didesain kontroler *sliding mode* untuk mengendalikan model tersebut. Dimana kontroler ini akan mengatur *level* dari tangki agar sesuai dengan *set point* yang diinginkan.

Koefisien dari numerator dan denominator sebagai fungsi alih dari Persamaan (3.20) dan Persamaan (3.21) akan dimisalkan menjadi variabel tetap agar lebih mudah dalam mendesain kontroler. Sehingga fungsi alih dari *plant* menjadi:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{as+b} \quad (3.22)$$

Transfer function di atas pada Persamaan (3.22) dapat direpresentasikan dalam bentuk persamaan diferensial (dengan asumsi nilai awal adalah nol):

$$\begin{aligned} a\dot{y} + by &= Ku \\ \dot{y} &= cy + du \\ \ddot{y} &= c\dot{y} + d\ddot{u} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Dimana,

$$\begin{aligned} c &= -\frac{b}{a} \\ d &= \frac{K}{a} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Lalu, ambil persamaan sinyal *error*

$$e = y_r - y \quad (3.25)$$

Didefinisikan suatu permukaan luncur sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\sigma_s &= \alpha e + \dot{e} \\ \dot{\sigma}_s &= \alpha \dot{e} + \ddot{e}\end{aligned}\tag{3.26}$$

Dimana $\alpha > 0$

Maka dapat dicari sinyal kontrol ekivalen sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\dot{\sigma}_s &= 0 \\ \alpha \dot{e} + \ddot{e} &= 0\end{aligned}\tag{3.27}$$

Masukkan Persamaan (3.25) ke Persamaan (3.27)

$$\alpha(\dot{y}_r - \dot{y}) + (\ddot{y}_r - \ddot{y}) = 0\tag{3.28}$$

Lalu, masukkan Persamaan (3.23) ke Persamaan (3.28)

$$\begin{aligned}\alpha(\dot{y}_r - (cy + du)) + \ddot{y}_r - (c\dot{y} + d\dot{u}) &= 0 \\ \alpha\dot{y}_r - \alpha(cy + du) + \ddot{y}_r - (c\dot{y} + d\dot{u}) &= 0 \\ \alpha\dot{y}_r - \alpha cy - \alpha du + \ddot{y}_r - c\dot{y} - d\dot{u} &= 0 \\ \alpha du &= \alpha\dot{y}_r - \alpha cy + \ddot{y}_r - c\dot{y} - d\dot{u} \\ u &= \frac{\dot{y}_r}{d} - \frac{cy}{d} + \frac{\ddot{y}_r}{\alpha d} - \frac{c\dot{y}}{\alpha d} - \frac{\dot{u}}{\alpha} \\ u_{eq} &= \frac{\dot{y}_r}{d} - \frac{cy}{d} + \frac{\ddot{y}_r}{\alpha d} - \frac{c\dot{y}}{\alpha d} - \frac{\dot{u}_{eq}}{\alpha}\end{aligned}\tag{3.29}$$

Setelah ditemukan sinyal kontrol ekivalen, selanjutnya adalah mencari sinyal kontrol natural.

$$\dot{\sigma}_s = \alpha\dot{y}_r - \alpha cy - \alpha du + \ddot{y}_r - c\dot{y} - d\dot{u}\tag{3.30}$$

Dimana,

$$u = u_{eq} + u_n \quad (3.31)$$

Masukkan Persamaan (3.31) ke Persamaan (3.30), maka di dapat:

$$\dot{\sigma}_s = \alpha \dot{y}_r - \alpha c y - \alpha d(u_{eq} + u_n) + \ddot{y}_r - c \dot{y} - d(\dot{u}_{eq} + \dot{u}_n) \quad (3.32)$$

Kemudian masukkan Persamaan (3.29) ke Persamaan (3.32)

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_s &= \alpha \dot{y}_r - \alpha c y - \alpha \dot{y}_r + \alpha c y - \ddot{y}_r + c \dot{y} + \dot{u}_{eq} - \dots \\ &\quad \alpha \dot{u}_n + \ddot{y}_r - c \dot{y} - \dot{u}_{eq} - \dot{u}_n \\ \dot{\sigma}_s &= -\alpha \dot{u}_n - \dot{u}_n \end{aligned} \quad (3.33)$$

Berdasarkan syarat kestabilan *Lyapunov*, maka dipilih:

$$\dot{\sigma}_s = -W \cdot \text{sat}(\sigma_s) \quad (3.34)$$

$$-\alpha \dot{u}_n - \dot{u}_n = -W \cdot \text{sat}(\sigma_s)$$

$$\alpha \dot{u}_n = W \cdot \text{sat}(\sigma_s) - \dot{u}_n$$

$$u_n = \frac{W}{\alpha d} \cdot \text{sat}(\sigma_s) - \frac{\dot{u}_n}{\alpha} \quad (3.35)$$

Dimana $W > 0$.

Persamaan (3.29) dan Persamaan (3.35) merupakan persamaan differensial untuk sinyal kontrol ekivalen dan sinyal kontrol natural yang nantinya akan didesain pada diagram blok program kontroler dengan menggunakan MATLAB. Sinyal kontrol total merupakan hasil penjumlahan dari sinyal kontrol ekivalen dan sinyal kontrol natural seperti Persamaan (3.31).

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

Pada bab ini, dipaparkan hasil simulasi dan analisis dari *Sliding Mode Controller* yang telah dirancang pada BAB III pada *plant coupled tank*.

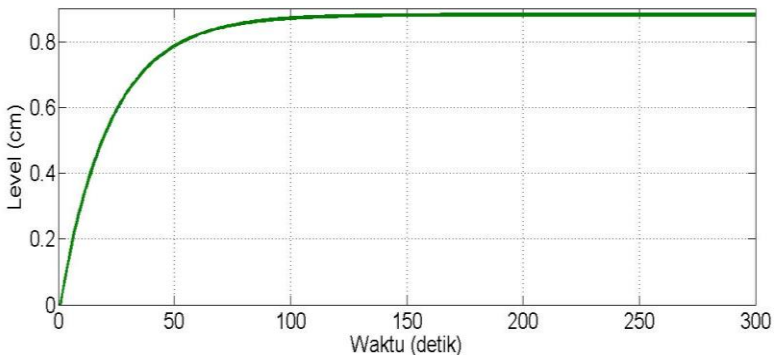
4.1. Pengujian Tanpa Kontroler

Pada tahap ini dilakukan pengujian model *plant* dengan tidak menggunakan kontroler. Dari tahap ini nanti akan dibandingkan dengan hasil pengujian antara model *non-linear* dan model *linear*.

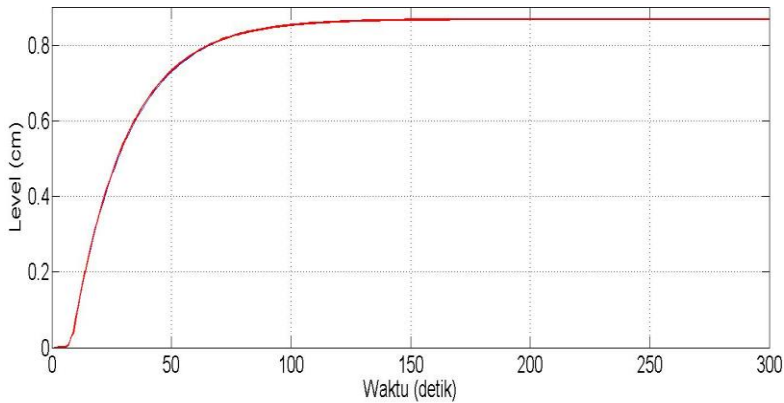
4.1.1. Simulasi Model *Non-Linear* dan Model *Linear*

Simulasi model *non-linear* dan *linear* ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari *Plant Coupled Tank* apakah model *linear* dari sistem sudah memenuhi atau sesuai dengan model *non-linear* sehingga hasil nilai yang diambil sama.

Pengujian dilakukan untuk melihat hubungan antara *input* yang berupa tegangan dan *output* berupa ketinggian *level* air pada tangki. Berikut ini merupakan perbandingan model *non-linear* dan model *linear* dengan pendekatan *steady state* untuk respon pada tangki 1 dan tangki 2.



Gambar 4.1. Respon Model *Non-Linear* dan Model *Linear* Tangki 1

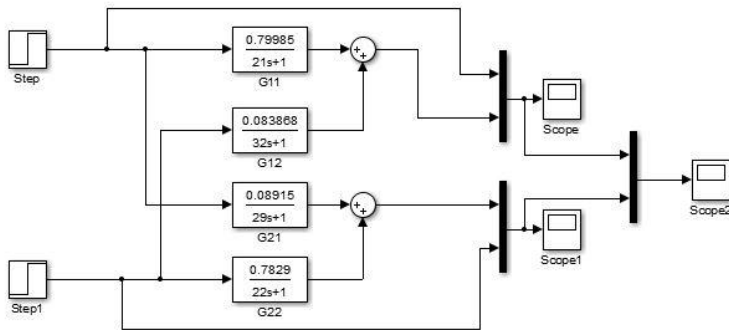


Gambar 4.2. Respon Model *Non-Linear* dan Model *Linear* Tangki 2

Dari simulasi yang dilakukan pada kedua tangki dapat dilihat bahwa hasil dari pemodelan dengan cara pendekatan respon *steady state* memiliki respon yang sama antara model *non-linear* dan model *linear* dengan nilai *error steady state* sebesar 0,1%.

4.1.2. Respon *Open Loop Linear Tanpa Decoupling*

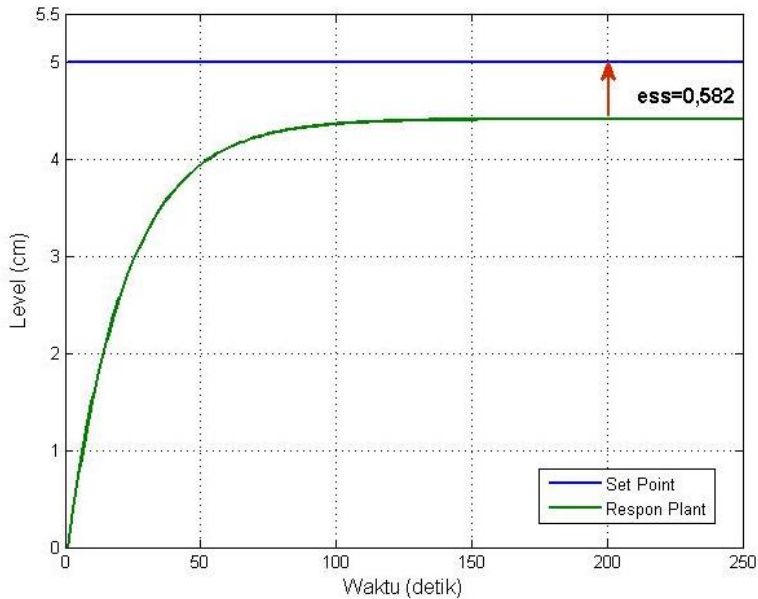
Pada tahap ini dilakukan simulasi sistem *plant coupled tank* pada tangki 1 dan 2. Respon *open loop* dilakukan untuk menguji respon *plant coupled tank* apabila tidak dilakukan proses control *close loop*. Dari persamaan fungsi alih G_{11} , G_{12} , G_{21} , dan G_{22} pada Persamaan (3.8), (3.9), (3.10) dan (3.11) dilakukan pengujian *open loop* tanpa diberi kontroler terlebih dahulu seperti yang terlihat pada Gambar (4.3).



Gambar 4.3. Diagram Simulasi Sistem *Open Loop* Tanpa *Decoupling*

Yang pertama, dilakukan simulasi pada *plant* tangki 1. Sinyal uji yang diberikan berupa sinyal *step* dengan *set point* lima. Dengan fungsi hasil yang digunakan adalah fungsi hasil yang didapatkan pada proses pemodelan yang dilakukan pada Bab III. Dimana terdapat beberapa fungsi hasil yang ada pada persamaan fungsi alih G_{11} , G_{12} , G_{21} , dan G_{22} pada Persamaan (3.8), Persamaan (3.9), Persamaan (3.10) dan Persamaan (3.11). Hasil simulasi didapatkan respon sistem seperti pada Gambar (4.4). Dimana pada simulasi yang dilakukan ini masih belum diberikan model *decoupling* dan juga belum diberikan kontroler *sliding mode*.

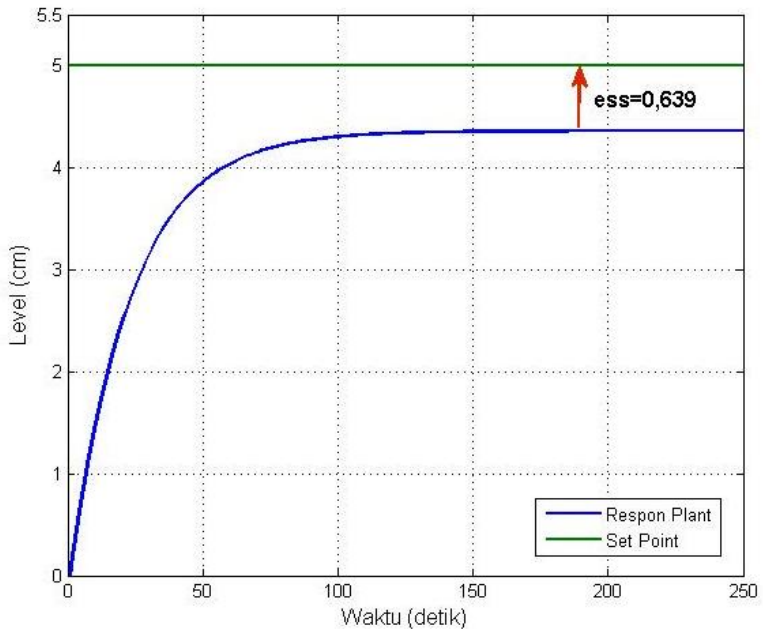
Di sini diuji dengan menggunakan sinyal *step* yang merupakan representasi dari *level* air yang diinginkan. Dengan masukan bernilai lima diharapkan dapat terlihat *error steady state* antara *set point* dan juga hasil dari respon dari *plant*.



Gambar 4.4. Respon Sistem *Open Loop* Tanpa *Decoupling* Tangki 1

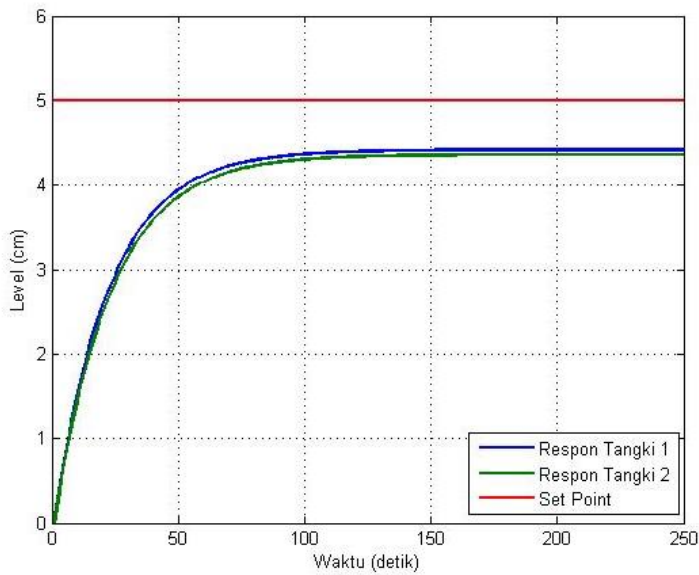
Dari respon sistem pada Gambar (4.4) tersebut dapat diamati bahwa sistem *open loop* tanpa *decoupling* tangki 1 masih memiliki kesalahan tunak, yaitu sebesar 0,582 dengan *time settling* sekitar 60 detik.

Selanjutnya dilakukan simulasi pada tangki 2. Sinyal uji yang diberikan sama dengan sinyal uji yang diberikan pada *plant* tangki 1. Hasil simulasi didapatkan respon sistem seperti pada Gambar (4.5).



Gambar 4.5. Respon Sistem *Open Loop* Tanpa *Decoupling* Tangki 2

Dari respon sistem pada Gambar (4.5) tersebut dapat diamati bahwa sistem *open loop* tanpa *decoupling* tangki 2 masih memiliki kesalahan tunak, yaitu sebesar 0,639 dan *time settling* sekitar 61 detik. Dari sini dapat diamati bahwa antara respon pada tangki 1 dan tangki 2 tidak terpaut jauh perbedaanya.

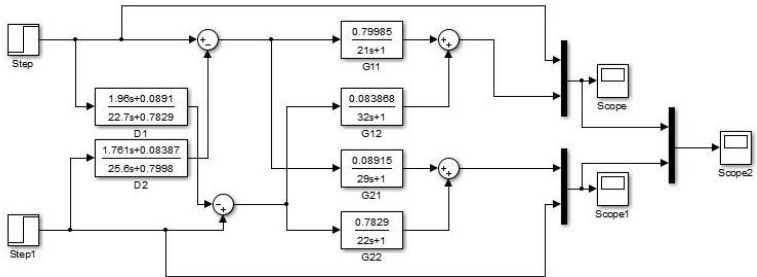


Gambar 4.6. Respon Sistem *Open Loop* Tanpa *Decoupling* Tangki 1 dan 2

Dari Gambar (4.6) dapat dilihat saat kedua tangki mendapatkan sinyal uji yang sama mempunyai perbedaan waktu tunak. Dimana kesalahan tunak dari tangki 1 lebih kecil dibandingkan dengan kesalahan tunak dari tangki 2.

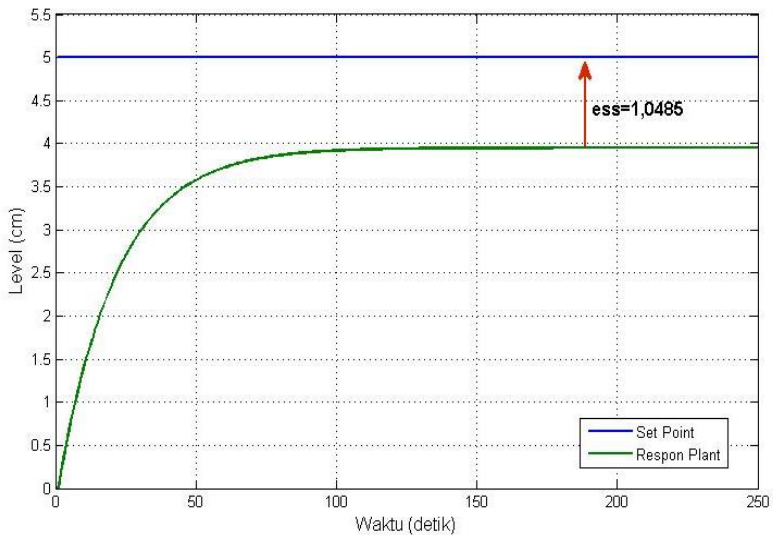
4.1.3. Respon *Open Loop* Proses *Level* dengan *Decoupling*

Pada tahap ini dilakukan simulasi *plant coupled tank* dengan menggunakan *decoupling* pada tiap tangki. Dimana fungsi alih D_1 dan D_2 pada Persamaan (3.14) dan (3.15) digabungkan pada simulasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar (4.7).



Gambar 4.7. Diagram Simulasi Sistem *Open Loop* dengan *Decoupling*

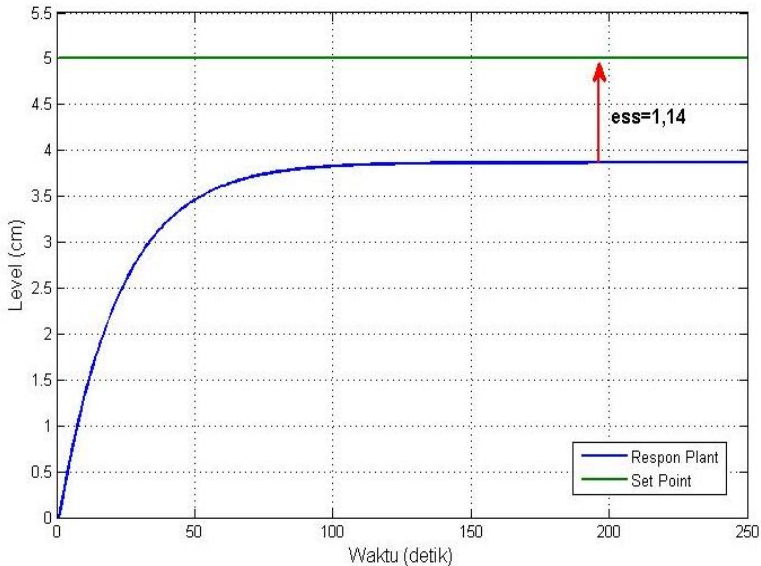
Yang pertama, dilakukan simulasi pada *plant* tangki 1. Sinyal uji yang diberikan berupa sinyal step dengan *set point* lima. Hasil simulasi didapatkan respon sistem seperti pada Gambar (4.8).



Gambar 4.8. Respon Sistem *Open Loop* dengan *Decoupling* Tangki 1

Dari respon sistem pada Gambar (4.8) tersebut dapat diamati bahwa sistem *open loop* dengan *decoupling* pada tangki 1 masih memiliki kesalahan tunak, yaitu sebesar 1,0485.

Selanjutnya dilakukan simulasi pada tangki 2. Sinyal uji yang diberikan sama dengan sinyal uji yang diberikan pada *plant* tangki 1. Hasil simulasi didapatkan respon sistem seperti pada Gambar (4.9).



Gambar 4.9. Respon Sistem *Open Loop* dengan *Decoupling* Tangki 2

Dari respon sistem pada Gambar (4.9) tersebut dapat diamati bahwa sistem *open loop* dengan *decoupling* pada tangki 2 masih memiliki kesalahan tunak, yaitu sebesar 1,14.

4.2. Pengujian Simulasi Menggunakan Kontroler

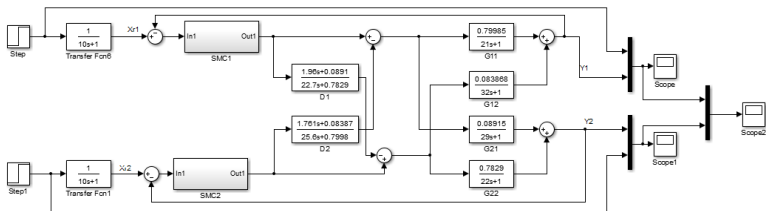
Pada tahap ini, akan dilakukan simulasi untuk menguji performa dari kontroler *Sliding Mode*. Algoritma control yang digunakan adalah kontroler *Sliding Mode* dengan sinyal control naturan U_N berupa sinyal saturasi. Pada simulasi ini akan dilakukan pengujian *level* dari *plant coupled tank*. Prosedur pengujiannya adalah dengan menggunakan sinyal *step*.

Sistem yang telah dirancang pada Bab III disimulasikan terlebih dahulu sebelum diimplementasikan, simulasi menggunakan *software* MATLAB R2013a untuk mengetahui respon sinyal kontrol.

4.2.1. Blok Diagram Simulink

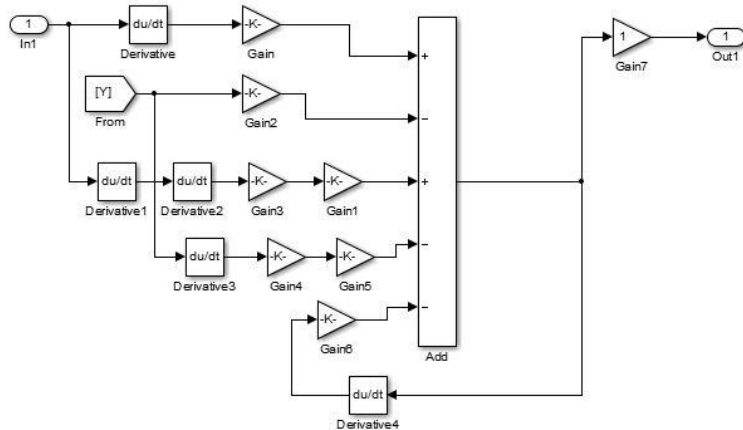
Pada blok diagram simulasi kontroler, keluaran dari kontroler merupakan penjumlahan antara sinyal kontrol ekivalen dan sinyal kontrol natural. *Input* pada sinyal kontrol ekivalen berupa *error* dan *output* dari kontroler, sedangkan *input* pada sinyal kontrol natural hanya dari *error* saja.

Keluaran dari *plant* berupa *output* y yang menjadi masukan dari sinyal kontrol ekivalen. Model referensi yang diharapkan mendapatkan masukan berupa sinyal *step*. Keluaran dari *plant* diharapkan dapat mengikuti keluaran dari model referensi yang sudah di desain. Simulasi keseluruhan *plant* dengan kontroler ditampilkan pada Gambar 4.10.



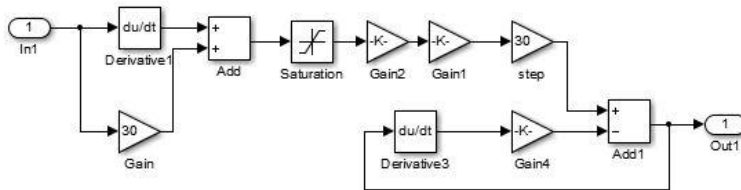
Gambar 4.10. Simulasi Kontroler SMC

Gambar (4.11) merupakan *subsystem* sinyal kontrol ekivalen di mana nilai dari parameter didapatkan dari parameter *plant* yang dituliskan pada Bab III. Adapun parameter yang digunakan dalam perancangan sinyal kontrol ekivalen yaitu nilai K , A , B , C , D , dan α . Sedangkan pemodelan yang digunakan adalah pemodelan *linear* yang telah dicari atau ditentukan pada Bab III.



Gambar 4.11. Subsystem Sinyal Kontrol Ekuivalen

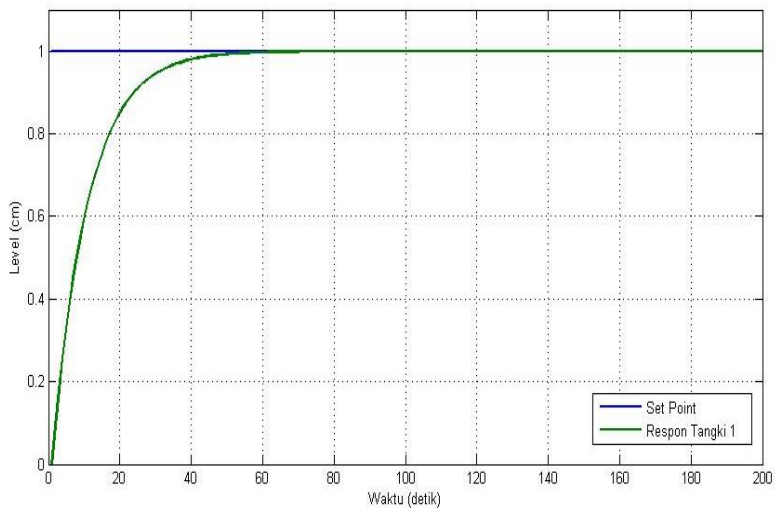
Gambar 4.12 merupakan *subsystem* dari sinyal kontrol natural dimana nilai dari parameter didapatkan dari model yang telah dipaparkan pada Bab III, yaitu W , D , dan α .



Gambar 4.12. Subsystem Sinyal Kontrol Natural

4.2.2. Hasil dan Analisa Simulasi pada *Plant Non-Linear*

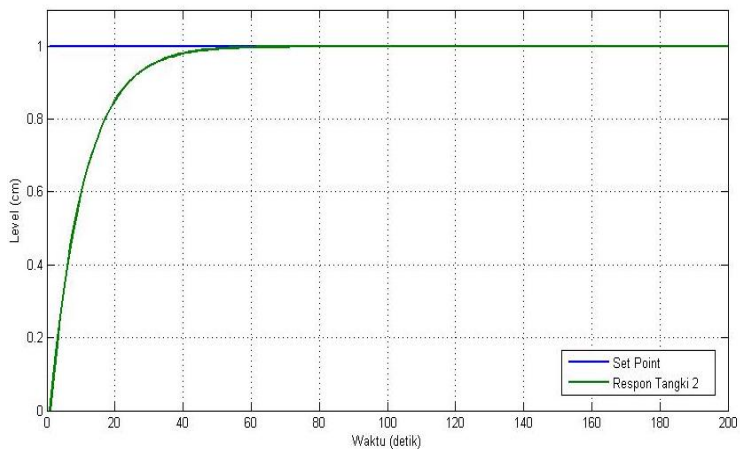
Pada bagian ini dilakukan pengujian pada *plant coupled tank* dengan model *non-liner* dengan menambahkan perubahan parameter setiap 10 detik pada konstanta *valve* yang berfungsi sebagai gangguan dari *plant*. Berikut ini merupakan hasil pengujian pada tangki 1:



Gambar 4.13. Respon pada Tangki 1 *Non-Linear* dengan Kontroler

Dari Gambar (4.13) dapat dilihat bahwa hasil respon memiliki waktu *steady state* sekitar 60 detik dan memiliki *rise time* sekitar 20 detik.

Selanjutnya adalah pengujian dari tangki 2 dengan model *non-linear* dengan menggunakan kontroler.

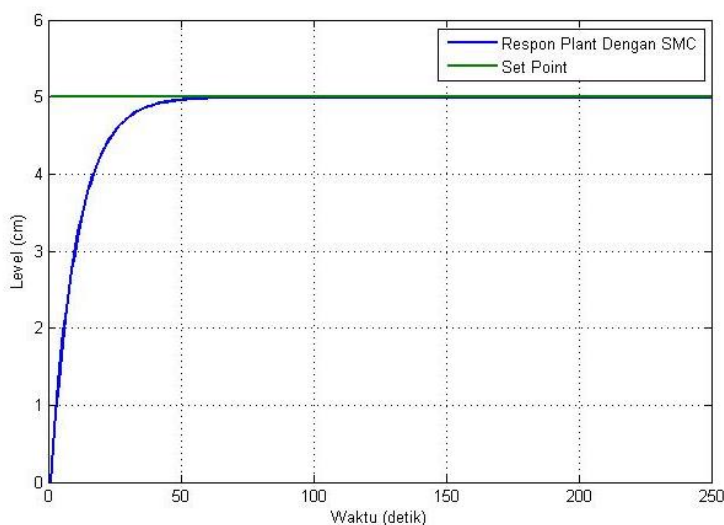


Gambar 4.14. Respon pada Tangki 2 *Non-Linear* dengan Kontroler

Dari Gambar (4.14) dapat dilihat bahwa hasil respon memiliki waktu *steady state* sekitar 66 detik dan memiliki *rise time* sekitar 23 detik. Dari repon untuk tangki 1 dan tangki 2 tidak memiliki perbedaan yang mencolok.

4.2.3. Hasil dan Analisa Simulasi pada *Plant Linear*

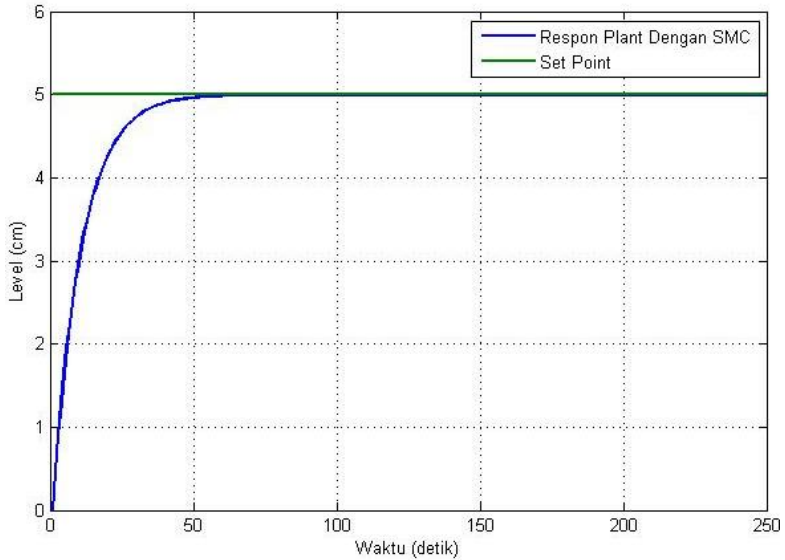
Pada tahap ini dilakukan pengujian pada *plant coupled tank* pada tangki 1 dan tangki 2 dengan menggunakan sinyal uji berupa sinyal *step*. Berikut ini merupakan hasil pengujian pada tangki 1 adalah sebagai berikut:



Gambar 4.15. Respon pada Tangki 1 *Linear* dengan Kotroler

Dari Gambar (4.15) dapat dilihat bahwa respon tersebut mulai *steady state* pada waktu 60 detik dan mempunyai *rise time* sekitar 20 detik.

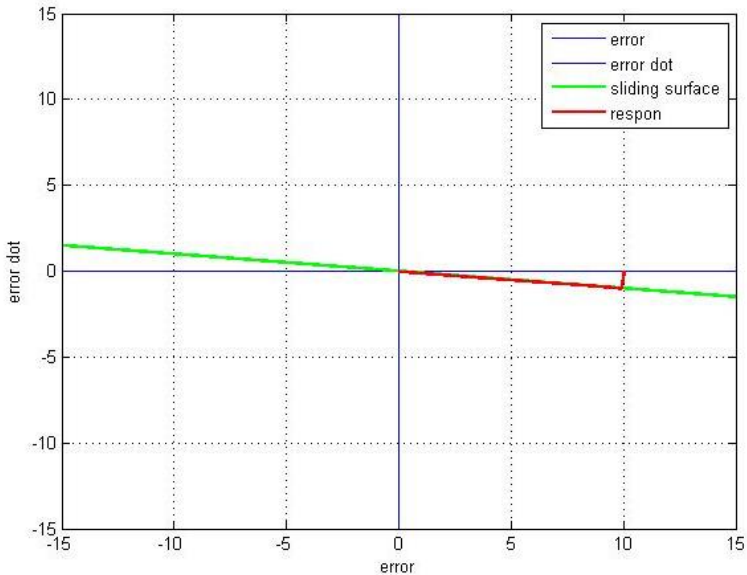
Selanjutnya dilakukan pengujian pada tangki 2 dengan menggunakan sinyal uji berupa sinyal *step*. Berikut ini adalah hasil pengujian pada tangki 2.



Gambar 4.16. Respon pada Tangki 2 *Linear* dengan Kontroler

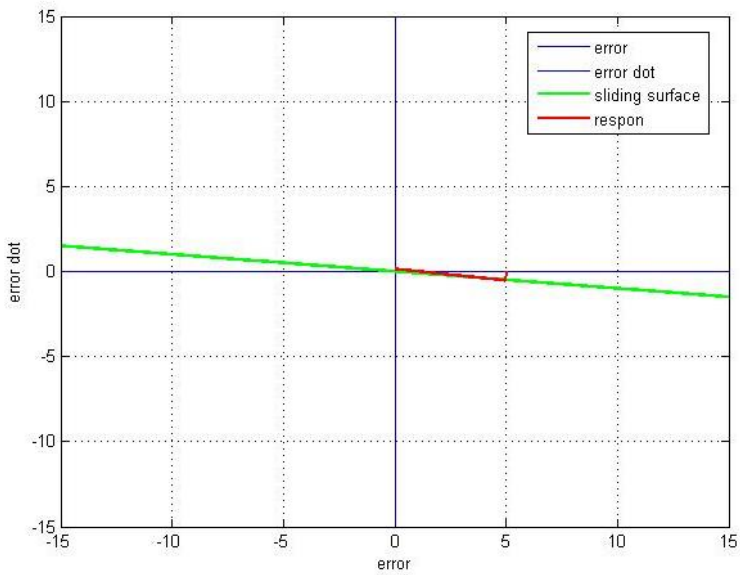
Dari Gambar (4.16) dapat dilihat bahwa respon tersebut mulai *steady state* pada waktu 67 detik dan mempunyai *rise time* sekitar 24 detik.

Dengan melihat hasil respon dari tangki 1 dan tangki 2, dapat disimpulkan bahwa hasil respon yang didapatkan tidak terlalu jauh dikarenakan kontroler yang dirancang adalah kontroler dari hasil pemodelan *linear* yang dapat memperkecil *error* pada *plant* yang *linear* juga.



Gambar 4.17. *Sliding Surface* dari Respon Tangki 1

Pada Gambar (4.17) terdapat hubungan antara garis *error*, *error dot*, *sliding surface* dan respon *error* yang terdapat pada *plant*. Garis yang berwarna merah adalah respon dari *error* yang dihasilkan dari *plant*, yang mana respon *error* tersebut menuju garis *sliding surface* mulai dari nilai 10 yang merupakan *set point* dari tangki 1 yang menuju ke titik *origin*. Dari analisa Gambar (4.17) dapat dilihat bahwa kontroler yang dibuat sesuai dengan keinginan dikarenakan kontroler dapat menarik respon *error* ke bidang *sliding surface* untuk dibawa ke titik *origin*.



Gambar 4.18. Sliding Surface dari Respon Tangki 2

Pada Gambar (4.18) sama dengan hasil *sliding surface* pada tangki 1 dimana terdapat hubungan antara garis *error*, *error dot*, *sliding surface* dan respon *error* yang terdapat pada *plant*. Garis yang berwarna merah adalah respon dari *error* yang dihasilkan dari *plant*, yang mana respon *error* tersebut menuju garis *sliding surface* mulai dari nilai 5 yang merupakan *set point* dari tangki 2 yang menuju ke titik *origin*. Dari analisa Gambar (4.18) dapat dilihat bahwa kontroler yang dibuat sesuai dengan keinginan dikarenakan kontroler dapat menarik respon *error* ke bidang *sliding surface* untuk dibawa ke titik *origin*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

PENUTUP

Pada Bab ini akan dibahas mengenai hasil akhir dari pengerjaan Tugas Akhir meliputi kesimpulan dan saran sebagai referensi tambahan agar penelitian yang akan dilakukan setelahnya dapat lebih baik lagi.

5.1. Kesimpulan

Dari analisa yang telah dilakukan terhadap hasil simulasi maka dapat disimpulkan bahwa :

- a. Pengaturan *level* menggunakan *sliding mode control* menghasilkan respon sistem dengan *chattering* teredam.
- b. Pengaturan *level* menggunakan *sliding mode control* menghasilkan respon sistem yang dapat mengikuti model referensi yang diharapkan.
- c. Metode *Sliding Mode Control* yang diaplikasikan pada *plant coupled tanks* model linier didapatkan *error steady state* masing-masing sebesar 0,008 dan 0,0066.
- d. Metode *Sliding Mode Control* yang diaplikasikan pada *plant coupled tanks* model non-linier didapatkan *error steady state* masing-masing sebesar 0,02 dan 0,012.

5.2. Saran

Dari hasil penelitian yang dilakukan, untuk pengembangan berikutnya, disarankan beberapa hal berikut ini:

- a. Pemodelan dan pemahaman tentang *coupled tanks* akan membantu perancangan sistem yang lebih baik dan mendapatkan model matematika yang lebih akurat.
- b. Pengetahuan program yang lebih baik akan memudahkan implementasi algoritma kontrol yang akan digunakan dan dianalisis.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Darmawan, Rheza Qashmal, "Desain Autotuning Kontroler PID Berbasis Algoritma Neural-Network Untuk Sistem Pengaturan Cascade Level dan Flow Liquid pada Plant Coupled Tanks", *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Elektro ITS Surabaya, 2016.
- [2] Arjin Numsomran, Tianchai Suksri, Maitree Thumma, "Design of 2-DOF PI Controller with Decoupling for Coupled-Tank Process", *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2007.
- [3] Al Amin, Anas, "Pengaturan Tekanan Boiler-Turbine Berbasis Hybrid Fuzzy PID.", *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Elektro ITS Surabaya, 2012.
- [4] Elrosa, Ilmiyah, "Traction Control pada Parallel Hybrid Electric Vehicle dengan Metode Generalized Predictive Control", *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Elektro ITS Surabaya, 2014.
- [5] Ogata, K., "*Modern Control Engineering*", Prentice Hall, New Jersey, 1997.
- [6] Harapan, Okky Sugianto, "Perancangan dan Implementasi Kontroler Sliding Mode untuk Pengaturan Level pada Couple Tanks", *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Elektro ITS Surabaya, 2010.
- [7] M. Li, F. Wang and F. Gao, "PID - Based Sliding Mode Controller for Nonlinear Processes", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 40, No. 12, pp. 2660 - 2667, 2001.
- [8] Choi, Y.J., Lee, M.C., "PID Sliding Mode for Steering Lateral Moving Strip in Hot Strip Rolling", *International Journal of Control, Automation, and Systems*, pp.399-407, 2009.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

RIWAYAT PENULIS



Penulis bernama lengkap Bobby Dwi Apriyadi, lahir di Madiun pada tanggal 15 April 1993. Penulis memulai jenjang pendidikan dasar di SDN 03 Oro-Oro Ombo Madiun pada tahun 1999, kemudian melanjutkan pendidikannya di SMPK Santo Yusuf Madiun pada tahun 2005 dan kemudian berlanjut ke SMAN 1 Madiun di tahun 2008. Pendidikan tingkat Sarjana ditempuh penulis pada tahun 2012 di Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Jawa Timur. Pada bulan Juni 2016, penulis mengikuti seminar dan ujian tugas akhir di Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)